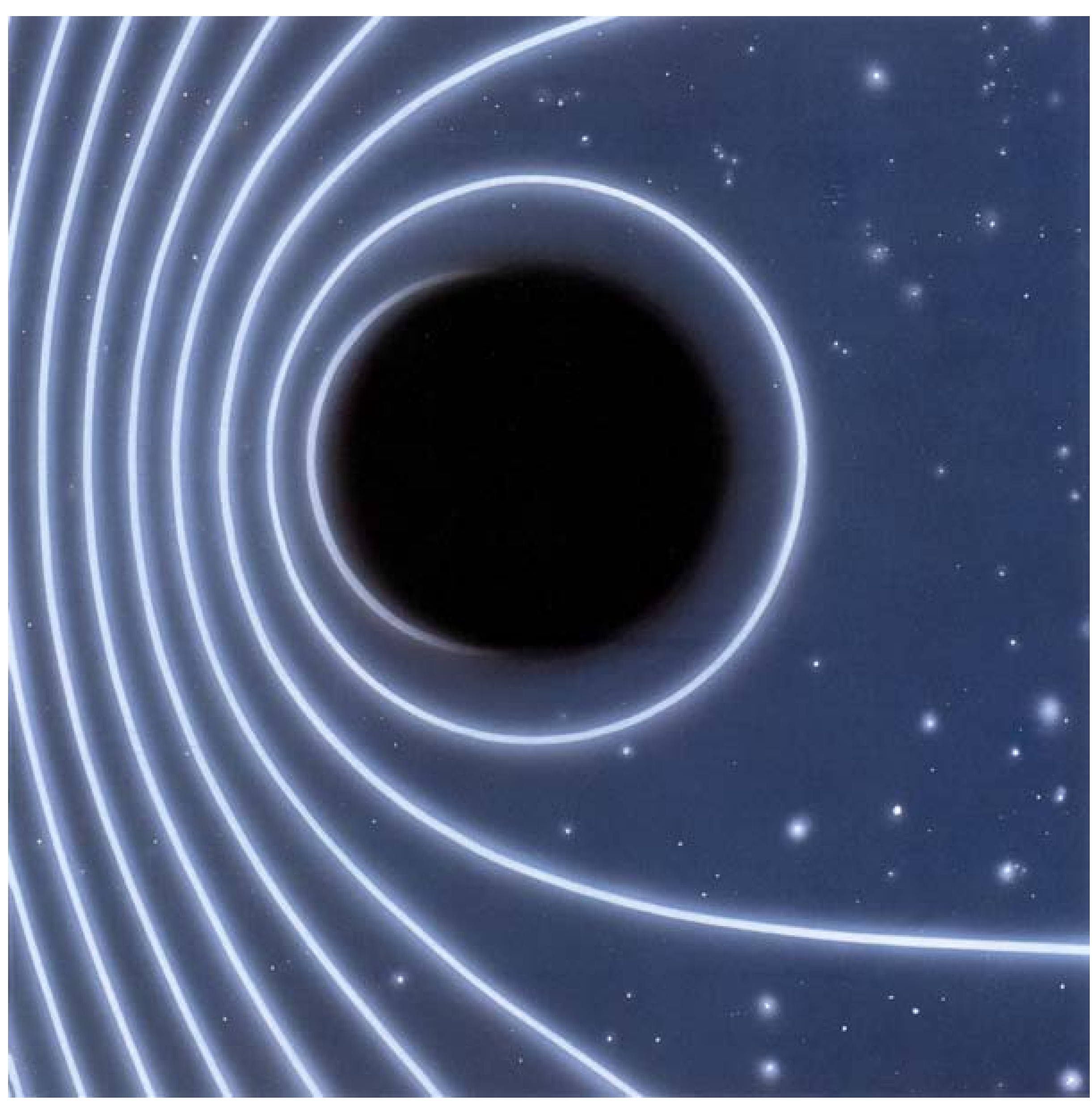
INVESTIGACION y CIENCIA

HACIA UNA INMUNOTERAPIA CONTRA EL CANCER

PANTALLAS PLANAS

ESTRATEGIAS PARA MITIGAR LOS DESASTRES NATURALES

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



AGUJEROS NEGROS

MAYO 1993
700 PTAS.




Mayo de 1993 Número 200

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *Los agujeros negros y la paradoja de la fuerza centrífuga*; Esteban Santiago: *Inmunoterapia contra el cáncer*; Amando García: *Pantallas planas*; Joandomènec Ros: *Identificación de sus patrones por las avispas parásitas*; J. M. García de la Mora: *Las lámparas de la Edad de Hielo*; Ana M.ª Avila: *Bosques de inundación amazónicos*; Santiago Torres: *Los nuevos giros del ADN;* J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

Perfiles:

Luis Alonso

Ciencia y sociedad:

Santiago Torres, E. Battaner, J. M.ª V. Martínez, Ramón Pascual y Emilio Elizalde

Ciencia y empresa:

Luis de Sopeña y Manuel Puigcerver

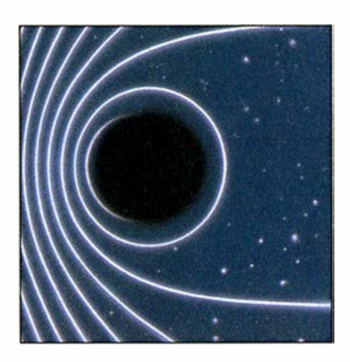
Libros:

R. Farré, M. I. Vicente, A. I. Alcalde, J. de Lorenzo y L. Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Alfred T. Kamajian

Página	Fuente
6-13	Francisco J. Ayala-Carcedo
15	Jack Harris/Visual Logic
16-19	Jared Schneidman/JSD
21	Bernard Sordat, Instituto Suizo de Investigación sobre el Cáncer, Lausanne
23-27	Ian Worpole
40-41	John S. Foster, Jane Frommer y Jacquelin K. Spong, IBM Thomas J. Watson Research Center (*izquierda*), Michael Goodman (*derecha*)
42	Photonics (*arriba, izquierda*), Planar Systems (*arriba, derecha*), Michael Goodman (*abajo*)
43	Michael Goodman
44	Laurie Grace
45	Carolco
47	Waina Cheng/Bruce Coleman, Inc.
48	Patricia J. Wynne
49-51	Guilbert Gates/JSD
52	Patricia J. Wynne
54-55	Sophie de Beaune, cortesía de Musée des Antiquités Nationales, Saint-Germain, France
56	Jim Wagner (*izquierda*), cortesía de Sophie de Beaune (*derecha*)
57	Cortesía de Sophie de Beaune (*izquierda*), Johnny Johnson (*derecha*)
58	Johnny Johnson
59	Tom McHugh/Photo Researchers, Inc.
61	Michael Goulding
62	Joe LeMonnier
63	Michael Goulding
64-65	Patricia J. Wynne
66	Michael Goulding
68-69	Marilyn A. Houck, Texas Tech University (cortesía de *Science*)
70-73	Michael Goodman
74	Davis Freeman
75	Forest McMullin/Black Star
83	Andrew Christie
84-89	Pour la Science



LA ILUSTRACION de la portada representa rayos de luz que curva el campo gravitatorio de un agujero negro. La curvatura de la luz es la clave para entender algunos de los efectos paradójicos que tendrían lugar cerca de un agujero negro. En una región del espacio libre de campos gravitatorios, los rayos de luz describen líneas rectas perfectas. Cerca de un agujero negro, de acuerdo con la teoría de la relatividad general de Einstein, los rayos de luz se curvan, y pueden llegar a ser circulares (véase "Los agujeros negros y la paradoja de la fuerza centrífuga", por Marek Artur Abramowicz, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
Juan Pedro Campos
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.400	15.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

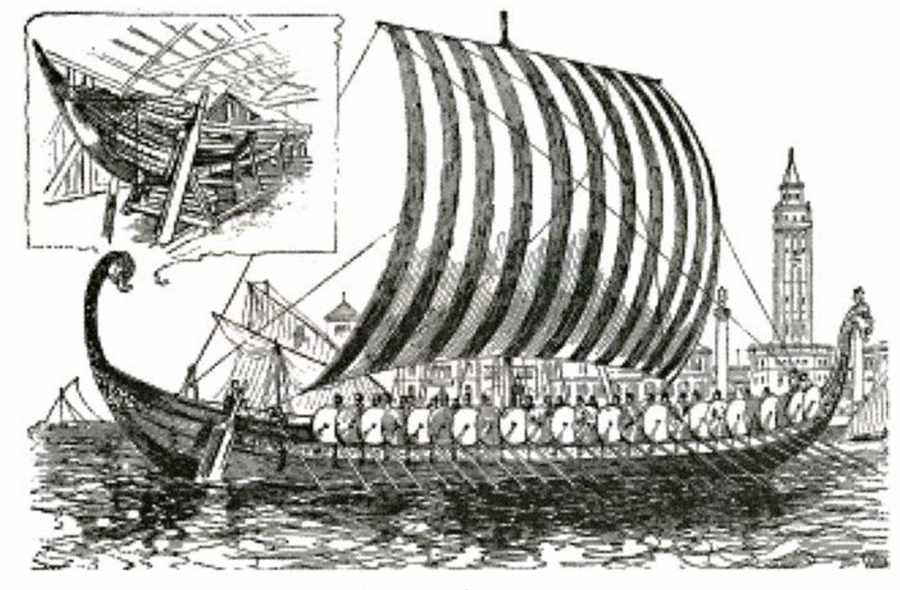
... cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «En resumidas cuentas, la longevidad es probablemente el mejor índice del peso 'ideal'. Un estudio a gran escala realizado por la Compañía de Seguros de Vida Metropolitan ha demostrado definitivamente que un sobrepeso moderado resulta beneficioso para los adultos jóvenes, pero que cumplidos los treinta y cinco años, más o menos, la mejor parte toca a las mujeres con un peso parecido al promedio. Entre las personas de mediana edad o que la hayan sobrepasado ya, ganan la partida de la longevidad quienes anden cortos de peso. Incluso entre los jóvenes, hay que rebajar las ventajas de un poco de sobrepeso, pues dos importantes enfermedades, la tuberculosis y la neumonía, que antaño fueron responsables en gran medida de la mortalidad superior de los jovenes de poco peso, ya han sido controladas.»

«En un reciente debate sobre los helicópteros, Igor Sikorsky hizo saber que su modelo actual ha volado a una velocidad máxima de 80 millas por hora con dos personas a bordo, mostrando una excepcional docilidad y gran suavidad de navegación. Estima que, durante los primeros años de producción, el precio de un helicóptero se equipararía al de un avión de precio medio; pero de fabricarse en serie, el precio se acercaría al de un automóvil medio.»

«Ensayos preliminares han revelado que los potentes rayos X generados por el betatrón poseen la particular ventaja de producir sus mayores efectos a unos cuatro centímetros por debajo de la superficie del cuerpo. Con la terapia por rayos X empleada hasta ahora, el efecto es máximo en la superficie y decrece con la penetración. La utilización directa de los electrones de alta velocidad producidos por el betatrón podría resultar aún más beneficiosa que los rayos X. Los rayos X, en su mayor parte, prosiguen su camino mas allá del punto sometido a tratamiento y traspasan por completo el cuerpo del paciente. No sería éste el caso con los electrones, los cuales, a 20 millones de volts, penetrarían hasta diez centímetros, y no más.»

«Nuestra búsqueda de los orígenes del hombre se complica ante la posibilidad de que en los inicios de la Edad de Hielo hubiera un amplio repertorio de tipos humanos. ¿Cuál de ellos sería el verdadero ancestro del hombre moderno? ¿O es que hubo varios que contribuyeron, y el *Homo sapiens* ha sido desde un principio de sangre mestiza? Hasta ahora la ciencia no puede contestar con certeza a ninguna de esas preguntas. Pero los huesos procedentes de la quebrada de Barnfield, en Swanscombe, si realmente se encontrasen restos, podrían indicar la solución de un dilema de la mayor importancia que la prehistoria humana plantea, a saber: si una forma que se acercaba, por su apariencia, a nuestra propia especie alcanzó tal condición mucho tiempo atrás, en el oscuro panorama de la baja Edad de Hielo, o si, por el contrario, cada uno de nosotros desciende de un linaje humano de cejas prominentes, como el de Neandertal, que permaneció primitivo en todos los aspectos fundamentales hasta bien entrado el período de la última glaciación.»



Modelo de un barco vikingo

... cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «En una entrevista acerca de las ampliaciones y reformas del ferrocarril elevado que un periodista del *Tribune* le hizo a uno de sus directores, éste parece que se expresó de un modo algo distinto al que pretendía.

"Periodista: '¿Cree Vd que la actual estructura del elevado es lo bastante fuerte para resistir el peso adicional de tres vías y trenes más rápidos?'

"Mr. Sloan: 'Desde luego; no sabe usted con qué ansiedad vigilan nuestros técnicos la estructura actual. No paramos de examinarla con gran cuidado.'"»

«Los recientes experimentos sobre oscilaciones eléctricas han respaldado la idea de que la luz y las oscilaciones eléctricas son idénticas. Las partes principales en que concuerdan son la velocidad, la propagación rectilínea, las leyes de la reflexión, la interferencia, la refracción, la polarización y la absorción por la materia. De hecho, la única diferencia parece encontrarse en la longitud de onda. En el campo de la telegrafía sin hilos el tema reviste obvio interés. Podemos confiar en que muy pronto telegrafiaremos sin cables por tierra y mar gracias a oscilaciones eléctricas de gran potencia y alta frecuencia.»

«No hace demasiado se desenterraron, en distintos puntos de Noruega, restos de antiguas naves vikingas, cuyos modelos van ahora a exhibirse en Chicago. Nuestra ilustración representa uno de esos modelos, el cual ha zarpado recientemente hacia América, tras haber visitado la mayoría de las ciudades de la costa escandinava. Se trata de una copia exacta de una antigua nave vikinga, cuyos restos aparecieron en 1880 junto a Sandefjord, Noruega.»

Estrategias para la reducción de desastres naturales

Las Naciones Unidas han declarado, el de los noventa, "decenio internacional para la reducción de desastres naturales". Partiendo del análisis de riesgos, podemos evaluar las técnicas de mitigación

Francisco Javier Ayala-Carcedo

El año pasado, un tsunami en la isla indonesia de Flores producía la muerte de más de 1600 personas y causaba 700 bajas el terremoto de El Cairo. Desastres moderados a pesar de todo, si los comparamos con el ciclón que asoló Bangladesh a fines de abril de 1991, con un saldo de 133.000 víctimas entre muertos y desaparecidos. Un año antes, otro terremoto iraní acabó con la vida de 40.000 personas. A esos desastres naturales debiéramos añadir los producidos por la técnica, si bien en el segundo caso la proporción con respecto al total de fallecidos es mínima.

En efecto, si excluimos las guerras, los grandes desastres de origen técnico son casi tres órdenes de magnitud menores que los máximos naturales. El terremoto de Shensi, ocurrido en China en 1556, se ha estimado que mató a 830.000 personas; el escape de gas tóxico de Bopal provocó unas 1500 bajas; 1403 personas se ahogaron en el hundimiento del *Titanic* en 1912 al chocar el transatlántico con un iceberg. Aunque el derretimiento de Chernobyl en 1986, que liberó cincuenta veces más radiación que la bomba atómica de Hiroshima, podría cambiar esta valoración. De acuerdo con ciertos cálculos, podría ser el responsable de 14.000 a 475.000 muertes por cáncer.

Los desastres naturales de mayor alcance están desencadenados por terremotos, tifones e inundaciones, con cifras de varios cientos de miles de víctimas mortales en cada caso. Así, el colapso del Krakatoa en 1883 generó un tsunami que produjo 36.417 muertes. Los deslizamientos subsecuentes al terremoto chino de Kansu en 1920 provocaron otras 100.000. Pero las víctimas mortales no son el único aspecto social de los desastres naturales. Por cada muerte hay que contar, además, entre 5 y 10 heridos que requieren atención hospitalaria y unas 50 personas que pierden su hogar y deben ser realojadas. En los episodios mayores, se desarticula la administración pública y los pueblos afectados se quedan sin organización política ni medios económicos para hacer frente a la catástrofe.

El riesgo de desastres naturales, computado por el total anual de víctimas mortales, no es sin embargo el principal. Los accidentes automovilísticos en los países de la Comunidad Europea suponen casi 50.000 muertos y millón y medio de heridos; otro tanto puede decirse de las enfermedades infecciosas y lacras sociales (alcoholismo o tabaquismo). En España, la media anual de víctimas por peligros naturales en el período 1989-1991 fue de 110 al año; las víctimas en accidentes automovilísticos rozaron las 6000.

El impacto económico de los desastres naturales tampoco iguala las pérdidas causadas por otros riesgos. De acuerdo con nuestros propios datos, los daños totales mundiales del bienio 1990-1991 fueron de 46.820 millones de dólares, es decir, en torno al 0,24 % del Producto Bruto mundial. Su incidencia en el PIB de los países desarrollados es de este mismo orden (0,20 % en España); pero su efecto en la economía de las regiones más afectadas es mucho mayor, cifrándose por encima del 2 por ciento, un auténtico freno para la promoción de estas naciones subdesarrolladas.

Ante semejante situación, se entiende el interés de las Naciones Unidas por reducir la incidencia de los desastres y la consagración del decenio 1990-2000 a ese objetivo. El cumplimiento de esto exige dos tipos de actuaciones: preventivas y en emergencias. Las estrategias preventivas buscan reducir el riesgo, un concepto nacido en el siglo XVIII a propósito de la seguridad del transporte marítimo, que se mide por las pérdidas potenciales humanas o económicas en una región. Las medidas preventivas resultan más eficaces que las tomadas en situaciones de emergencia. Hoy, carece de sentido que las políticas nacionales se muevan al compás del último desastre o de la inercia inversora, ya que las estrategias pueden diseñarse con criterios objetivos.

La actuación preventiva debe centrarse en los factores de riesgo: peligrosidad, vulnerabilidad y exposición. Es inmediato que un movimiento sísmico en el desierto no implica riesgo alguno porque no hay exposición de personas o bienes materiales; en cambio, otro menor en un casco urbano destruye inmuebles y acarrea la muerte de miles de personas.

De acuerdo con su expresión formal, llamamos riesgo al producto de la probabilidad de ocurrencia de un desastre por la vulnerabilidad en tanto por uno y la exposición. Si la exposición se indica mediante la población involucrada, se calculará el riesgo social en víctimas potenciales por año; si se expresa en valor de los bienes expuestos, se calculará el riesgo económico en unidades monetarias al año.

FRANCISCO JAVIER AYALA-CARCEDO dirige el área de ingeniería geoambiental del Instituto Tecnológico Geominero de España. Doctor ingeniero de minas, se formó en la Universidad Politécnica de Madrid. Ha trabajado durante 22 años en ingeniería geotécnica, de riesgos y ambiental.

A escala global, hemos de comenzar el análisis por la distribución de riesgos entre los diversos tipos de peligros naturales, que varía de acuerdo con la región estudiada. En esta geografía del riesgo, Africa, excluido el Magreb, presenta un riesgo muy pequeño de terremotos destructores, frecuentes en el Himalaya o los Andes; sin embargo, tiene un riesgo importante en plagas de langosta y sequías. En Estados Unidos el número mayor de bajas lo producen las tormentas eléctricas. En España, el riesgo social de mayor cuantía se relaciona con los naufragios en temporales marítimos (99 víctimas en el período 90-91), que supera al derivado de inundaciones (12 en el mismo período); sin embargo, los peores desastres pueden ser los causados por terremotos destructores, que se presentan, en promedio, cada cien años.

La distribución espacial se representa en mapas de peligrosidad, una pieza básica en la preparación del inventario de riesgos y gestión de emergencias. Así, el análisis de la distribución geográfica de los ciclones y tifones nos indica su concentración en las zonas tropicales adyacentes a océanos de aguas cálidas. Entre los volcanes activos, los más peligrosos por su mayor índice de explosividad se concentran en el "Cinturón de Fuego del Pacífico", en América occidental y Asia oriental. Si comparamos ahora el área afectada por erupciones volcánicas, alrededor de 1,5 millones de kilómetros cuadrados, con la superficie expuesta a movimientos sísmicos, de unos 15 millones de kilómetros cuadrados, y comparamos las víctimas mortales, advertiremos que guardan una relación similar: 260.000 en el caso de los volcanes y 2.500.000 en los terremotos. (Datos éstos correspondientes al período 1600-1980.)

La distribución geográfica permite imaginar el tamaño del desastre, cuyo análisis estadístico arroja datos de interés evidente. Los episodios con 10.000 muertos o más a principios del decenio significaron, en el mundo, más del 85 % del total de víctimas; correspondieron al terremoto de Irán en 1990 y al ciclón de Bangladesh en 1991. Dos desastres de un total de 114. Esta ha sido la tendencia observada hasta ahora. Lo que refuerza la idea de que la estrategia internacional debiera centrarse en regiones históricamente castigadas: Asia, Iberoamérica y el Mediterráneo, donde coinciden peligrosidad elevada y alta población expuesta.

La distribución temporal de los desastres depende del tipo de riesgo predominante. Hemos observado que, en China, salvo terremotos, la frecuencia de desastres y la distribución de víctimas mortales corrían paralelas a la distribución de precipitaciones propia de climas monzónicos, con máximas en el verano; en España, se siguen pautas de climas mediterráneos, con máximos en otoño-invierno. En ambos casos, la razón estriba en la preponderancia de los riesgos meteorológicos en los años analizados. El análisis temporal debiera servir de criterio para la organización de los medios de actuación en emergencia.

El incremento de víctimas y pérdidas económicas registrado a lo largo del siglo se achaca a veces a una mayor peligrosidad de los desastres naturales. Karnik, tras analizar los terremotos ocurridos en los últimos

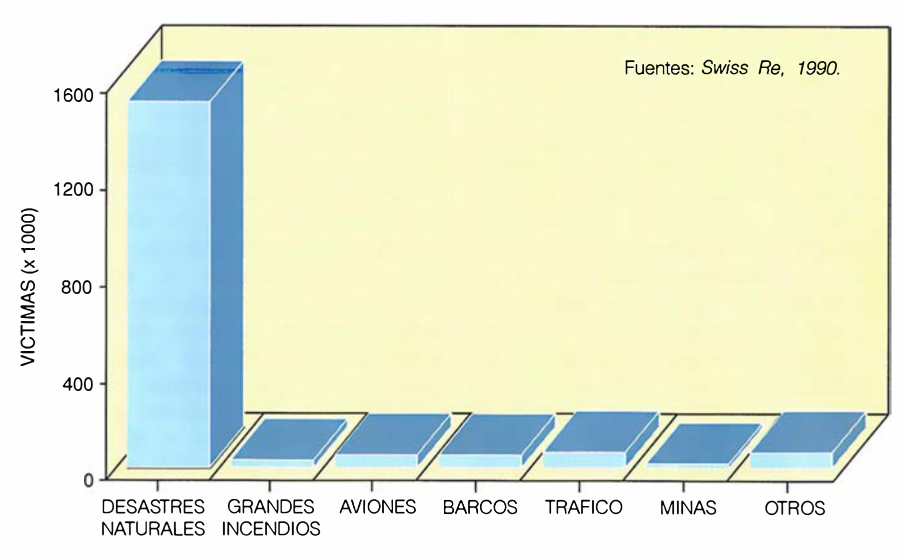


1. EL CICLON DE BANGLADESH de 1991, con 133.000 víctimas mortales, encabeza, por su siniestralidad, el elenco de desastres naturales de los últimos años. Buena parte de las víctimas podrían haber sido evitadas con la construcción de refugios elevados, una tarea en la que se había avanzado escasamente desde el ciclón que asoló el país en 1970.

cien años, no encontró datos que justificaran la hipótesis, aunque no debemos olvidar la existencia de épocas de vacío sísmico, de unos 1000 años en China y casi 200 en Turquía.

El motivo real de los desastres reside en el crecimiento demográfico (sobre todo en Asia e Iberoamérica), concentrado además en ciudades con edificaciones e infraestructuras vulnerables. El aumento observado en los daños económicos obedece a una mayor renta per cápita, que se ha multiplicado por 3,5 en los países en vías de desarrollo y por 6 en los desarrollados. El crecimiento de los daños tiene, pues, una causa social, no natural.

Para analizar el riesgo económico hemos de seguir pautas similares a las adoptadas en el estudio del riesgo social, si bien la fiabilidad de los datos económicos y su representatividad suelen ser menores. Las tasas de cobertura por seguros en los países desarrollados pueden rebasar incluso el 50 %; en el Tercer Mundo no alcanzan el 20 %.



2. VICTIMAS HUMANAS provocadas por los desastres naturales a lo largo del período transcurrido entre 1970 y 1989. La ilustración se ciñe al conjunto de episodios en que se produjeron, al menos, veinte bajas.

Identificados y caracterizados los objetivos, procede definir y evaluar las medidas técnicas de reducción del riesgo. Un primer grupo de éstas sirve para reducir el riesgo menguando la peligrosidad potencial. No siempre es posible; de hecho, dos de las causas principales de desastres, los terremotos y los ciclones, no admiten este tipo de medidas. Carecemos de medios técnicos adecuados para rebajar directamente la peligrosidad de un ciclón, una borrasca marítima o una "gota fría" como las que se forman en el Mediterráneo español a fines del verano y en otoño; podemos reducir, sin embargo, la peligrosidad de uno de sus efectos: las inundaciones. Por otra parte, los terremotos destructores, con focos a más de 10 kilómetros de profundidad y gigantescas potencias (el terremoto de San Francisco de 1906 desarrolló 10^{24} ergios en 6 segundos), se sustraen por ahora a nuestra capacidad técnica. Casi otro tanto puede afirmarse de las erupciones volcánicas; aunque seamos capaces de predecirlas en casi la mitad de los casos, no podemos intervenir en las cámaras magmáticas o las chimeneas, lo que no obsta para que actuemos sobre algunas coladas de lava, regándolas, desviándolas o encauzándolas con voladuras, como se ha hecho a veces en erupciones del Etna en Sicilia.

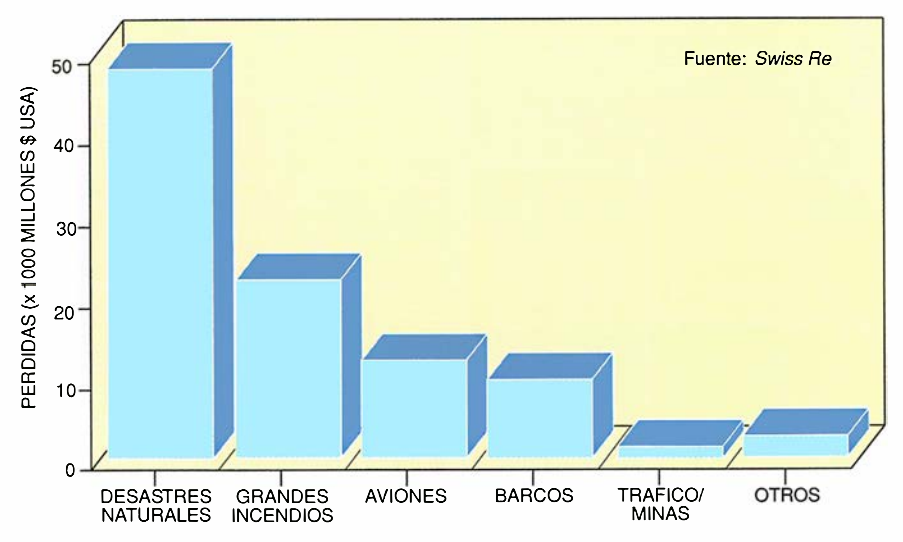
Las inundaciones son el fenómeno natural que admite mayor número de medidas preventivas con actuaciones en cauces y cuencas hidrográficas. Una inundación se caracteriza por el hidrograma, que expresa la relación entre caudales medidos en una sección del cauce y tiempo; presenta en los casos sencillos un pico, algo retrasado con respecto al de la precipitación. Cuanto mayor sea el caudal de pico, mayor será la altura alcanzada por el agua, que puede llegar a desbordarse. Las actuaciones conducentes a disminuir el caudal de pico se denominan medidas de laminación. Pueden construirse presas de laminación o mixtas (también para abastecimiento, regadíos y generación hidroeléctrica), actuar sobre la cuenca hidrográfica para rebajar el coeficiente de escorrentía (cociente de la fracción del agua que escurre sobre el terreno respecto al total caído) o aumentar el almacenamiento subsuperficial en el suelo del agua caída.

Las presas requieren inversiones importantes; una típica de la España mediterránea cuesta unos 5000 millones de pesetas y almacena unos 60 hectómetros cúbicos, equivalentes a la escorrentía anual de una cuenca de unos 200 kilómetros cuadrados. Gestionadas en períodos de intensas precipitaciones con sistemas informáticos, son una valiosa herramienta de laminación en los cauces principales. Su rendimiento se mide en términos de reducción de frecuencia de las inundaciones. Dado el criterio seguido para la avenida máxima de diseño, frecuentemente la que corresponde a un período de retorno de 500 años, es posible, sin embargo, que no ofrezca protección suficiente para precipitaciones de excepcional intensidad.

Las actuaciones en las cuencas vertientes, pensemos en la repoblación forestal, se miden a través de su influencia en la reducción de la escorrentía. Igual que en el caso precedente se recurre a modelos hidrológicos informatizados, que aquí dan la reducción de frecuencia de los desbordamientos, y en definitiva la merma de peligrosidad. La influencia de la vegetación sobre la escorrentía, positiva, decrece con la intensidad y duración de la lluvia. Las prácticas tradicionales de cultivo, así el abancalamiento, son beneficiosas. Pero no se olvide que la reforestación y la construcción de presas alteran los usos del suelo y pueden encontrar oposición social.

Las canalizaciones debilitan la peligrosidad por inundaciones en núcleos urbanos. Al aumentar la sección de paso y disminuir la rugosidad natural, esas obras permiten el flujo de un mayor caudal pico sin desbordamiento. La urbanización intensa de las cuencas vertientes eleva el coeficiente de escorrentía y restringe la capacidad de almacenamiento del suelo, produciendo un aumento de los caudales de pico. Este fenómeno, observado en São Paulo, ha motivado el diseño de un tratamiento integral de la cuenca para reducir las inundaciones.

Asimismo, los deslizamientos y desprendimientos rocosos pueden en algunos casos estabilizarse gracias a la ingeniería geotécnica, con lo que su peligrosidad se anula. En resumen, la acción de técnicas reductoras de la peligrosidad se traduce en una disminución de la probabilidad de ocurrencia del desastre y de su intensidad o severidad.



3. PERDIDAS ECONOMICAS aseguradas en el mundo ante la eventualidad de desastres naturales. El período comprendido es el mismo anterior, de 1970 a 1989. Ese capítulo representa alrededor del 45 % del conjunto de daños asegurados.

Puede acometerse también la reducción de la vulnerabilidad, expresada en porcentaje o en tanto por uno destruido de un bien o afectado en una población expuesta. A diferencia de las medidas de reducción de peligrosidad, la mayoría de los riesgos naturales admiten siempre algún tipo de actuación de esta clase. Así, el hundimiento de techos por caída de piroclastos y cenizas en el entorno de los volcanes activos, observado recientemente en el Pinatubo, se hubiera evitado con un diseño reforzado para hipótesis de espesor de piroclastos e impactos. En el caso de las inundaciones, pueden realizarse edificaciones con plantas bajas exentas o construir sobre rellenos en las zonas inundables. La acción del viento queda recogida en los códigos constructivos. La propia vulnerabilidad de las edificaciones en zonas con deslizamientos o hundimientos lentos de gran dimensión puede paliarse con cimentaciones sobre losa armada o pilotes (deslizamiento), y arriostramiento de pilares, siempre que el movimiento no exceda de un umbral. Quizá la invención más espectacular contra la vulnerabilidad fue la del pararrayos por Benjamin Franklin en 1752. Desgraciadamente, la carencia de escalas objetivas de vulnerabilidad constituye uno de los mayores obstáculos para el análisis objetivo de los riesgos naturales.

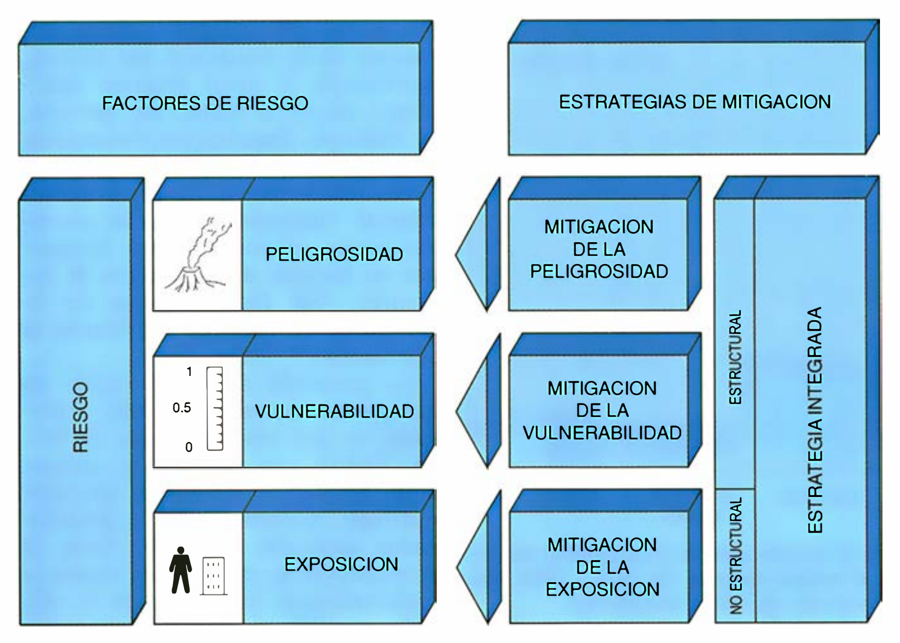
En todos los casos, la eficacia de las medidas depende del período de retorno, del "peligro de diseño" adoptado, que ha venido calculándose a partir de series de datos aplicando distribuciones estadísticas, de tipo exponencial, propias de valores extremos. En 1935, Gutenberg y Richter enunciaron la ley de su nombre para terremotos, de carácter logarítmico, que liga probabilidad y magnitud. En definitiva, estas medidas reducen el daño potencial, el riesgo, rebajando la probabilidad de fenómenos dañinos hasta la del "peligro de diseño", límite a partir del cual bienes y personas, hasta allí protegidos, se vuelven vulnerables.

A reducir la vulnerabilidad tienden muchos esfuerzos ingenieriles. Cuanto menor es el período de retorno de diseño, menos costoso resulta éste y menor el período cubierto. La utilización de períodos de retorno demasiado cortos es una característica frecuente de los códigos constructivos en países en vías de desarrollo, cuya vulnerabilidad es, consecuentemente, mayor que en los países desarrollados; en esa mayor vulnerabilidad se encierra la clave de la incidencia de los desastres naturales en el Tercer Mundo.

El grueso del esfuerzo investigador sobre vulnerabilidad se ha centrado en los terremotos, por la sencilla razón de que la única estrategia viable para limitar el riesgo es adaptar las construcciones. Para un terremoto de intensidad IX en la escala Mercalli Modificada (MM), que puede corresponder en el sur de la región valenciana a un período de 500 años, la reducción de la vulnerabilidad para una edificación de hormigón armado, según esté o no diseñado antisísmicamente, puede pasar de 0,7 a 0,22. Para facilitar el trabajo, podemos crear mapas de vulnerabilidad combinados con mapas de microzonación sísmica que reflejan las amplificaciones y atenuaciones locales de la peligrosidad sísmica (en función de la resistencia del terreno, morfología y nivel freático entre otras); así lo ha hecho, por ejemplo, el Instituto Tecnológico Geominero de España en la ciudad alicantina de Alcoy. Otro tipo de instalaciones altamente vulnerables para las personas suelen ser los campings levantados en llanuras de inundación de torrentes. Tal fue la causa de la muerte de 36 personas en Francia el año pasado.

La reducción de la exposición en que puedan encontrarse bienes y personas es otra vía para atajar el riesgo. Acorde con ese fin, la ordenación urbana y territorial persigue restringir la construcción o determinados usos del territorio. Suele ir acompañada de medidas de diseño y reglamentos de uso. Este tipo de medidas resultan en principio atractivas por su sencillez: localizadas las zonas expuestas con los correspondientes mapas de peligrosidad, se prohíbe la construcción y empleo de las mismas para eliminar el riesgo. Pero deben salvar dos contratiempos: los usos actuales del suelo y el interés competitivo para otros destinos legítimos. La verdad es que la población vuelve a utilizar las zonas expuestas a riesgo una vez pasado el desastre, sean las fértiles tierras volcánicas o las llanuras aluviales; el suelo es allí altamente valorado.

¿Cuáles serían, pues, los criterios a adoptar en la ordenación urbana y territorial compatibles con estos hechos? Ante todo, una comunidad debe ordenar los usos del suelo de tal forma que se proteja la vida de sus habitantes; éste es el criterio inspirador de las normas sismorresistentes. Existen situaciones en las que el uso residencial del territorio supone un riesgo para la vida, que podría ser considerado inadmisible si se trata de edificación de alta densidad. En el caso de las erupciones volcánicas, el riesgo ocurre en las faldas de los volcanes activos y zonas expuestas a lahares (corrientes de lodo volcánico), oleadas piroclásticas derivadas del colapso de columnas eruptivas (nubes ardientes capaces de subir por pendientes) o explosiones laterales. En el caso de los terremotos, puede suceder en las fallas sísmicas activas que no están disipando energía con desplazamientos. Los cauces de los torrentes de montaña o ramblas mediterráneas sujetas a inundaciones relámpago, en ambos casos con abundante carga sólida, son también zonas a evitar, como demuestran las inundaciones de Austria en 1988 o la destrucción en la

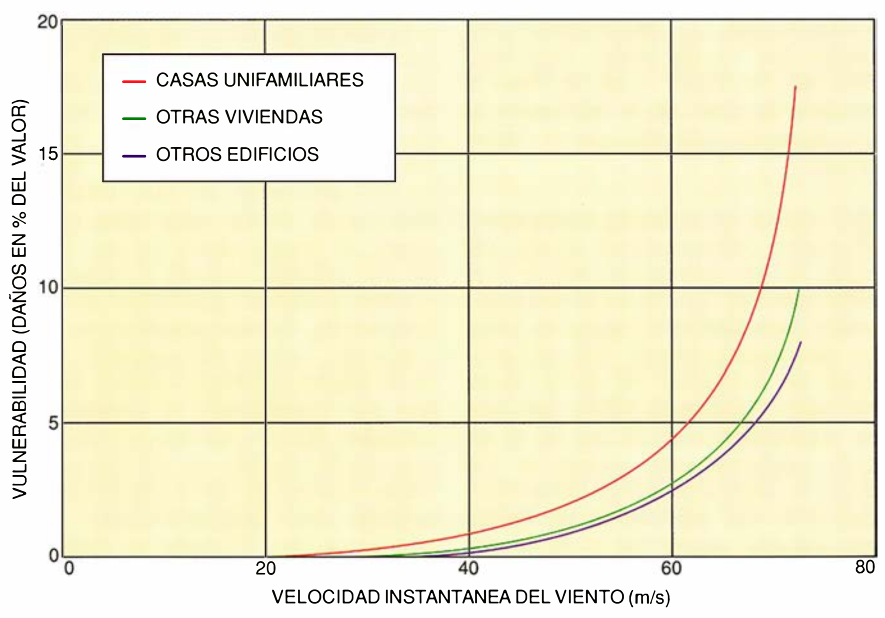


4. FACTORES DE RIESGO Y ESTRATEGIAS DE MITIGACION que pueden adoptarse contra los mismos. A pesar de la complejidad involucrada, pueden seguirse estrategias óptimas de acuerdo con criterios cuantitativos.

rambla de Puerto Lumbreras en 1972. Las laderas con arcillas rápidas, que pueden producir deslizamientos instantáneos y muy destructivos, bien conocidos en Suecia o Canadá, son zonas de riesgo real para la vida y los bienes. Otro tanto puede decirse de las áreas con cavidades kársticas subterráneas, donde la presencia de bóvedas en equilibrio precario que pueden hundirse súbitamente, especialmente en rocas carbonatadas, impone una gran prudencia en su uso. Dígase lo propio de las costas sujetas a tsunamis, grandes olas que alcanzan varias decenas de metros de altura al llegar a las costas barriéndolas tras originarse en el fondo del mar como consecuencia de terremotos intensos y viajar de forma prácticamente inadvertida a velocidades en torno a los 700 kilómetros por hora, que son también un elemento a considerar en el uso residencial del suelo. Allí donde no exista un sistema fiable de alerta, como el del Pacífico, no parece prudente la edificación.

La estrategia de respuesta en emergencias requiere que determinados servicios y centros vitales de una población queden a salvo. Debe asegurarse el mantenimiento del abastecimiento de agua, líneas telefónicas y eléctricas, carreteras de evacuación y suministro, centros políticos, policiales, hospitales y cuarteles de bomberos. Allí donde no se pueda ir contra la peligrosidad o vulnerabilidad tiene que garantizarse la permanencia operativa de esos servicios con medidas de ordenación urbana o territorial. No es mala solución el emplazamiento subterráneo de centros y líneas vitales. Cuando ello no ocurre, ni ha podido procederse a la evacuación preventiva, el desastre se transforma en catástrofe que deja inerme la población.

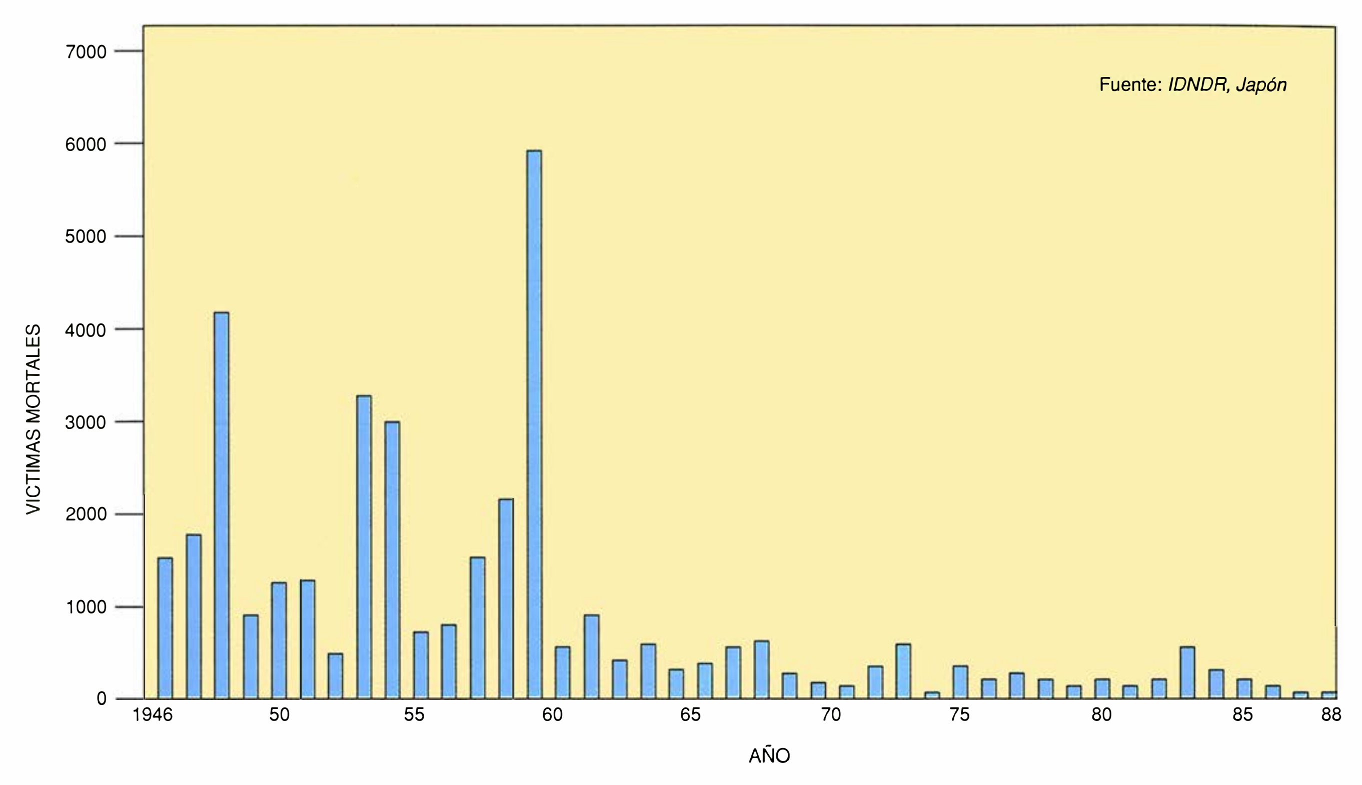
Garantizada la protección de la vida, la decisión sobre usos del suelo en zonas expuestas al riesgo es un problema de opción comunitaria y análisis coste-beneficio. El papel de los seguros de riesgos de la naturaleza es múltiple. En EE.UU. y para el caso de inundaciones, se dividen las zonas inundables según el período de retorno esperable, penalizando las zonas con período de retorno menor de 100 años. En España, el Consorcio de Compensación de Seguros asume las indemnizaciones para inundaciones, terremotos, erupciones, tempestad ciclónica y caída de meteoritos, con algunas penalizaciones para inundaciones.



5. VULNERABILIDAD DE LA EDIFICACION ante el acoso de los huracanes. Se mide el daño causado en función de la velocidad del viento. Este tipo de funciones, básico para la selección objetiva de medidas de mitigación de los riesgos, se ha establecido también en el caso de terremotos.

Aunque las actuaciones preventivas forman el núcleo central de toda estrategia, siempre es necesaria la planificación de las emergencias. Un primer campo de actuación es la vigilancia de las crisis, sobre todo en erupciones volcánicas, inundaciones y ciclones. Suele mediar en esos casos un tiempo de reacción entre la presentación de la crisis y el paroxismo de la misma; en este lapso de tiempo, debe entrar en acción la protección civil, responsable del seguimiento del episodio mediante comités de expertos ya constituidos de antemano y encargada de dictar las alertas preventivas, ordenar la evacuación y preparar los medios necesarios de acuerdo con la evolución del fenómeno.

El tiempo entre la presentación de una erupción volcánica y el paroxismo es menor de un día en el 45 % de los casos e inferior a una hora en el 23 %. De ello se desprende que la vigilancia de la crisis eruptiva sólo puede actuar con garantía si el



6. DRASTICA REDUCCION del número de bajas humanas por desastres naturales en el Japón desde la promulgación de la ley básica, en 1959, de medidas para prevenir los desastres que azotan al país: terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, deslizamientos y ciclones. Japón pasó de una media de 150 muertos por deslizamientos en 1938-58 a 20 en los años setenta.

volcán ha sido objeto de estudios y está instrumentado con sismógrafos, inclinómetros y otros medios predictivos; en su defecto, deben levantarse los correspondientes mapas de peligrosidad y riesgos. Es necesaria la coordinación con el Servicio Meteorológico que prevenga a la población y compañías aéreas y de transportes de las direcciones de la nube de cenizas.

Si se trata de ciclones y tifones, los satélites meteorológicos han posibilitado la predicción y el seguimiento en tiempo real y la emisión de las oportunas alarmas, que resultan vitales en el Caribe, el Indico o el Mar de China. Gracias a los sensores de infrarrojos, puede estudiarse la evolución de las temperaturas del mar y aire e incluso prever su desarrollo.

Las inundaciones se propagan a lo largo de un río de acuerdo con la "onda de avenida". La formación de tales ondas permite, una vez observadas y caracterizadas, prever aguas abajo el momento de llegada. Cuanto mayor es la cuenca, mayor es el "tiempo de concentración" que tarda el hidrograma en presentar el caudal pico. En cuencas menores de 100 km^2, la alerta puede ser materialmente imposible. Actualmente las alertas, escalonadas en varias fases, comienzan con la previsión meteorológica de frentes o "gotas frías" generadoras potenciales de intensas precipitaciones, siguen con la medida de precipitación por encima de un umbral crítico y continúan con la observación hidrológica directa. Este es el sistema seguido por la Protección Civil española y el Instituto Nacional de Meteorología.

En todos los casos anteriores, con posibilidad de predicción, la evacuación de la población hacia refugios o zonas seguras reduce drásticamente el riesgo. No sucede así con los terremotos. A pesar de que se conoce desde hace algunas décadas la variación de diversos parámetros antes del paroxismo (emisión anómala de radón, comportamiento electromagnético del terreno, emisión acústica, precursores y otros), no existe ningún método fiable para predecir magnitud y hora aproximada. Por ello, las actuaciones en emergencia en estas zonas deben concentrarse en la mitigación del propio desastre. En este sentido, la organización de equipos de rescate tras la localización rápida del epicentro es clave para reducir el número de víctimas, así como el realojamiento en zonas seguras para evitar daños en las réplicas que suelen seguir al terremoto principal y afectan a edificios ya dañados.

En ocasiones, el riesgo principal procede de fenómenos desencadenados por el suceso. Así aconteció con los incendios en el terremoto de San Francisco en 1906 y en Tokio en el de Kuanto en 1923 o en Longarone en 1963, cuando el deslizamiento súbito del monte Toc, tras unos pequeños movimientos previos, en el vaso del embalse francés de Vaiont, produjo una ola con altura estimada de 100 m que vació buena parte del mismo por encima de la coronación, y arrasó Longarone con un saldo de 2000 víctimas.

Completado el análisis de medidas de reducción del riesgo y evaluada su eficiencia, queda por definir la combinación de las mismas, es decir, configurar la estrategia óptima de reducción de riesgos. La realización de esta tarea es un problema típico de decisión óptima compleja, ya que los condicionantes existentes son diversos. Para ello, conviene prestar atención, primero, a los criterios ya descritos al tratar del papel de la ordenación urbana y territorial (protección de la vida y de los servicios básicos).

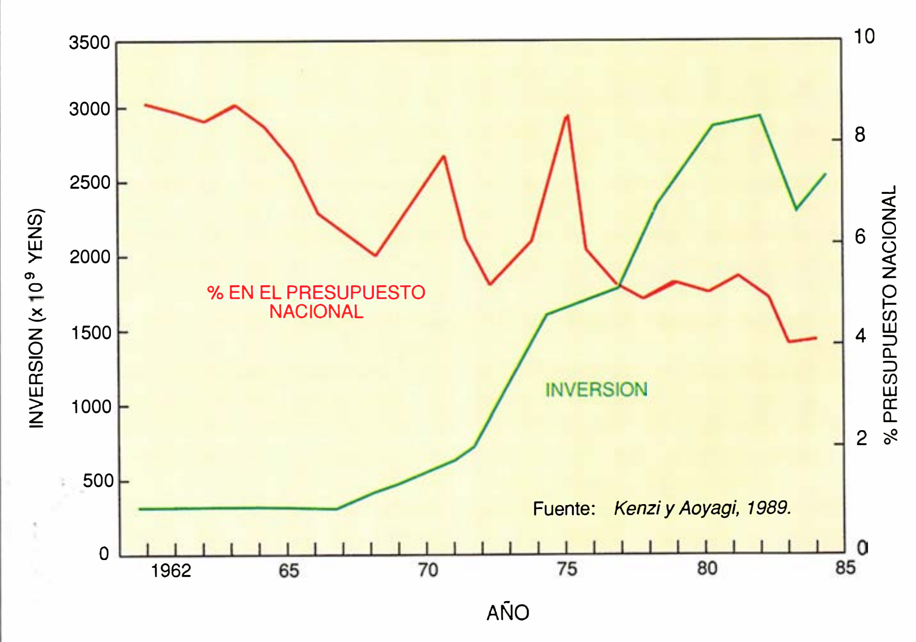
Deben evaluarse, en segundo lugar, los costos de diversas medidas de reducción que actúan sobre los factores del riesgo. En el caso de riesgo sísmico, las opciones son escasas: elegir el tipo de diseño sismorresistente de acuerdo con un nivel de vulnerabilidad admisible, construir en las zonas con menor

amplificación sísmica o hacerlo en varias hipótesis de densidad de edificación. En principio, el problema puede decidirse de acuerdo con un análisis coste-beneficio, considerando como beneficio anual el derivado de la reducción potencial de daños correspondiente a la menor vulnerabilidad, repartido entre el período de retorno actual, y teniendo en cuenta el período de servicio de la estructura.

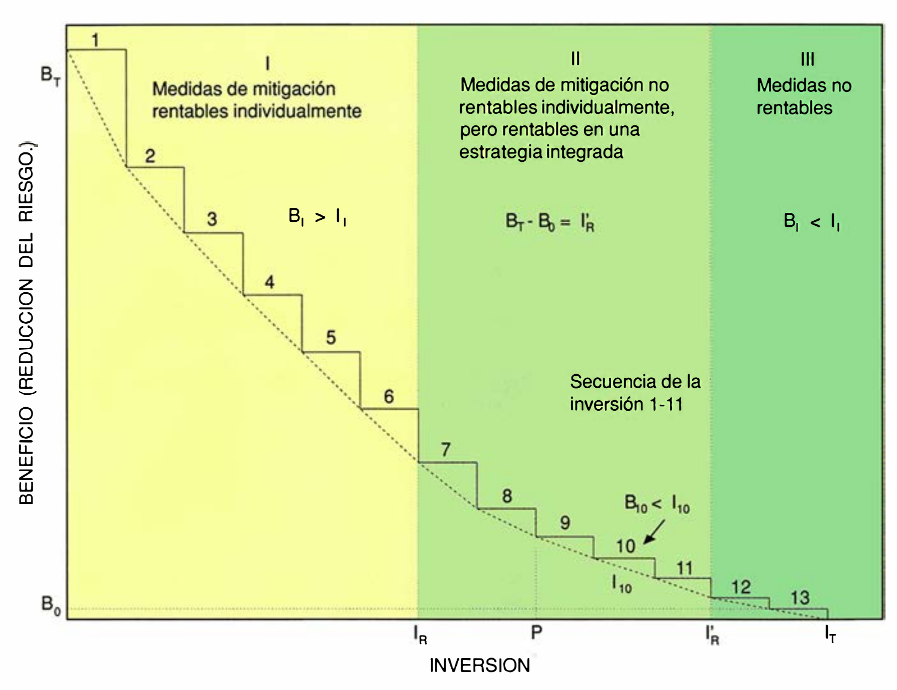
Demos un ejemplo simplificado. Para la hipótesis de un terremoto de diseño de intensidad X (Mercalli Modificada) con un período de retorno esperable de 100 años, coincidente con la vida útil de una edificación de costo sin diseño antisísmico de 20 millones de pesetas, y con ese diseño de 22, el coste a considerar serían 2 millones de pesetas para un beneficio esperable con una reducción de un 30 % de la vulnerabilidad de 6,6 millones. Si el período de retorno fuera de 500 años, el costo a considerar sería de 10 millones frente a un beneficio esperado de 6,6. Este tipo de análisis puede variar sustancialmente cuando se incorporan las indemnizaciones y costes que puedan producirse por muertos y heridos. En esa línea, podemos construir curvas que expresen la relación entre beneficios y períodos de retorno que ayuden a la decisión.

Tras las actuaciones públicas se esconde un factor determinante, el de los presupuestos disponibles. Pero es obvio que el problema de los riesgos no debe enfocarse sólo desde una perspectiva estrictamente economicista, sino que las decisiones han de tomarse en un marco más amplio, al tratarse de vidas humanas. Se ha demostrado, sin embargo, que la reducción de víctimas mortales fruto de desastres naturales en los Estados Unidos resulta más costosa, en términos unitarios, que en otros campos. A esa condición pueden asimilarse, salvando las distancias, los impactos ambientales negativos. El diseño óptimo en un campo donde no existen unidades de medida homogéneas tiene que recurrir a matrices de decisión que presenten en las filas las estrategias, descompuestas en sus elementos, y en columnas los diversos criterios (económicos directos y colaterales, sociales y ambientales) con un factor de ponderación. Evaluados los diversos elementos por un panel de expertos, las sumas ponderadas se comparan para tomar la decisión.

En España, mis últimas estimaciones sitúan las pérdidas medias anuales por inundaciones, durante los últimos veinte años, en un máximo de 20.000 millones de pesetas. Las inversiones medias anuales para avenidas en obras hidráulicas públicas en 1990-91 han superado los 30.000 millones. Dadas las bajas cifras de víctimas mortales, menos de 20 al año de media, gran parte en torrentes poco regulables, el costo por muerto evitado es enorme, de miles de mi-



7. INVERSIONES GUBERNAMENTALES en prevención de desastres naturales en Japón. Los costos de reducción de víctimas, bajos en los primeros años de aplicación de las estrategias nacionales, entran con rapidez en rendimientos decrecientes y deben contrastarse con los costes de reducción de víctimas en otros campos de la política nacional; esta situación es frecuente en países desarrollados.



8. ORDENACION SECUENCIAL de medidas de reducción del riesgo económico, a escala de país o región, para un determinado desastre natural o para el conjunto de ellos, ordenación que refleja sus rendimientos decrecientes. La utilidad de un planteamiento integrado para un criterio de selección de medidas de beneficio cero (B_0), se pone de manifiesto al ampliarse el conjunto de medidas posibles con las de la zona II, inabordables con un planteamiento individualizado. Esta es la principal justificación para la adopción de políticas nacionales promovidas por los gobiernos.

llones, especialmente si se compara con inversiones en Sanidad o Salvamento Marítimo.

El ejemplo del Japón merece analizarse. Desde la promulgación de la Ley Básica de Medidas en Desastres, de 1959, ha adoptado una política nacional activa para prevenir los numerosos desastres que lo amenazan: terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, deslizamientos y ciclones. Con porcentajes del presupuesto gubernamental en torno al 7 %, durante la década de los sesenta, el 6 % en los setenta y el 5 % en los ochenta, ha conseguido reducciones drásticas de víctimas y daños desde los primeros años de aplicación, con inversiones anuales públicas de alrededor de 1,2 billones de yens, unas 10.000 pesetas por habitante y año en los ochenta. (En España se pierden unas 2000.) Así, de una media anual de 150 muertos por deslizamientos en el período 1938-58 y 8000 casas destruidas se pasó a 30 muertos y 5000 casas destruidas en los sesenta y 20 muertos en los setenta.

Las cifras no sólo demuestran la viabilidad y eficiencia técnica de las estrategias integradas, sino también la acción rápida de los rendimientos decrecientes en la eficacia de las inversiones para reducir el riesgo. Importa tener en cuenta que la disminución del riesgo en un marco geográfico y tecnológico dado sigue esta ley decreciente respecto a la inversión: cada vez se necesita más inversión para conseguir la misma reducción del riesgo. Ello es así porque las soluciones más eficaces y menos costosas son las que primero se aplican. Este hecho vuelve muy difícil, por no decir prácticamente imposible, la reducción del riesgo a cero; de hecho, no existe esta situación en ninguna región geográfica extensa. En contrapartida, resalta la rentabilidad de las las inversiones en la reducción del riesgo en los países subdesarrollados, azotados por los grandes desastres y donde casi todo está por hacer.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NATURAL HAZARD RISK ASSESSMENT AND PUBLIC POLICY. W. J. Petak y A. A. Atkisson. Springer Verlag; Nueva York, 1982.

MAPA MUNDIAL DE LOS PELIGROS DE LA NATURALEZA, 2ª edición. Münchener Rück; Munich, 1987.

INTERNATIONAL CONGRESS ON ALLEVIATION OF NATURAL DISASTERS. World Federation of Engineering Organizations, 1991.

NATURAL DISASTERS IN THE WORLD, Instituto Tecnológico Geominero de España, 1990 y 1991.

Los agujeros negros y la paradoja de la fuerza centrífuga

Un objeto que orbite cerca de un agujero negro experimentará una fuerza centrífuga que lo empujará hacia dentro. Este efecto paradójico tiene importantes consecuencias astrofísicas

Marek Artur Abramowicz

Usted, sin duda, habrá viajado en coche, autobús o tren; usted, entonces, sabrá muy bien qué es la fuerza centrífuga: ese tirón que experimentamos en el interior de cualquier vehículo que esté trazando una curva y que actúa desde el centro de ésta hacia fuera. Podrá, pues, imaginarse perfectamente la sorpresa que, no hace demasiado tiempo, A. R. Prasanna, del laboratorio de investigaciones físicas de Ahmedabad, India, y yo nos llevamos al descubrir que, según la teoría general de la relatividad, hay circunstancias en que la fuerza centrífuga se dirige hacia el centro del movimiento circular, en vez de alejarse de él. Demostramos que, si una nave espacial se aproximase lo suficiente a un agujero negro, se experimentaría en ella una fuerza centrífuga que tiraría hacia dentro, no hacia fuera, y más cuanto mayor fuese su velocidad orbital. Justo lo contrario de lo que la experiencia corriente nos enseña.

Nuestros cálculos muestran que, en la región cercana al agujero negro, no sólo la fuerza centrífuga invierte su dirección, sino que todos los efectos dinámicos que dependen de la distinción entre lo que es apuntar hacia dentro y lo que es apuntar hacia fuera están también invertidos.

La causa de la paradoja es el fortísimo campo gravitatorio que el agujero negro genera. Como Albert Einstein predijo en 1915, un campo gravitatorio deforma el espacio y curva los rayos de luz. El campo gravitatorio del Sol curvará un rayo de luz que pase rozando su superficie un poco menos de una milésima de grado. Dado que un agujero negro genera un campo gravitatorio mucho más fuerte que el solar, desviará la luz mucho más.

Un agujero negro atrapará para siempre cualquier radiación o materia que se acerque demasiado a él. El punto de no retorno define el tamaño de un agujero negro, o su radio gravitatorio. Un agujero negro que tuviese la misma masa que el Sol tendría un radio gravitatorio de unos tres kilómetros. Si un rayo de luz viajara paralelamente a la superficie de un agujero negro a una distancia de tres veces el radio gravitatorio, se desviaría unos 45 grados. Lo que aún es más notable, si un rayo de luz pasara a una distancia del agujero negro de exactamente 1,5 veces el radio gravitatorio, orbitaría alrededor del agujero negro describiendo un círculo perfecto. La existencia del rayo circular de luz es elemento clave en la paradoja de la fuerza centrífuga.

Con Jean-Pierre Lasota (hoy en el Observatorio de París) descubrí la primera indicación de la paradoja casi por casualidad, hace casi 20 años, en el Centro Astronómico Copérnico de Varsovia. Bozena Muchotrzeb, alumno nuestro, había obtenido una fórmula según la cual un objeto que orbitara alrededor de un agujero negro por el mismo camino que un rayo de luz experimentaría siempre la misma fuerza total fuese la que fuese la velocidad con que girase, una fuerza que lo empujaría hacia dentro. En particular, un objeto en reposo experimentaría idéntica fuerza hacia dentro que un proyectil que recorriese el círculo a casi la velocidad de la luz.

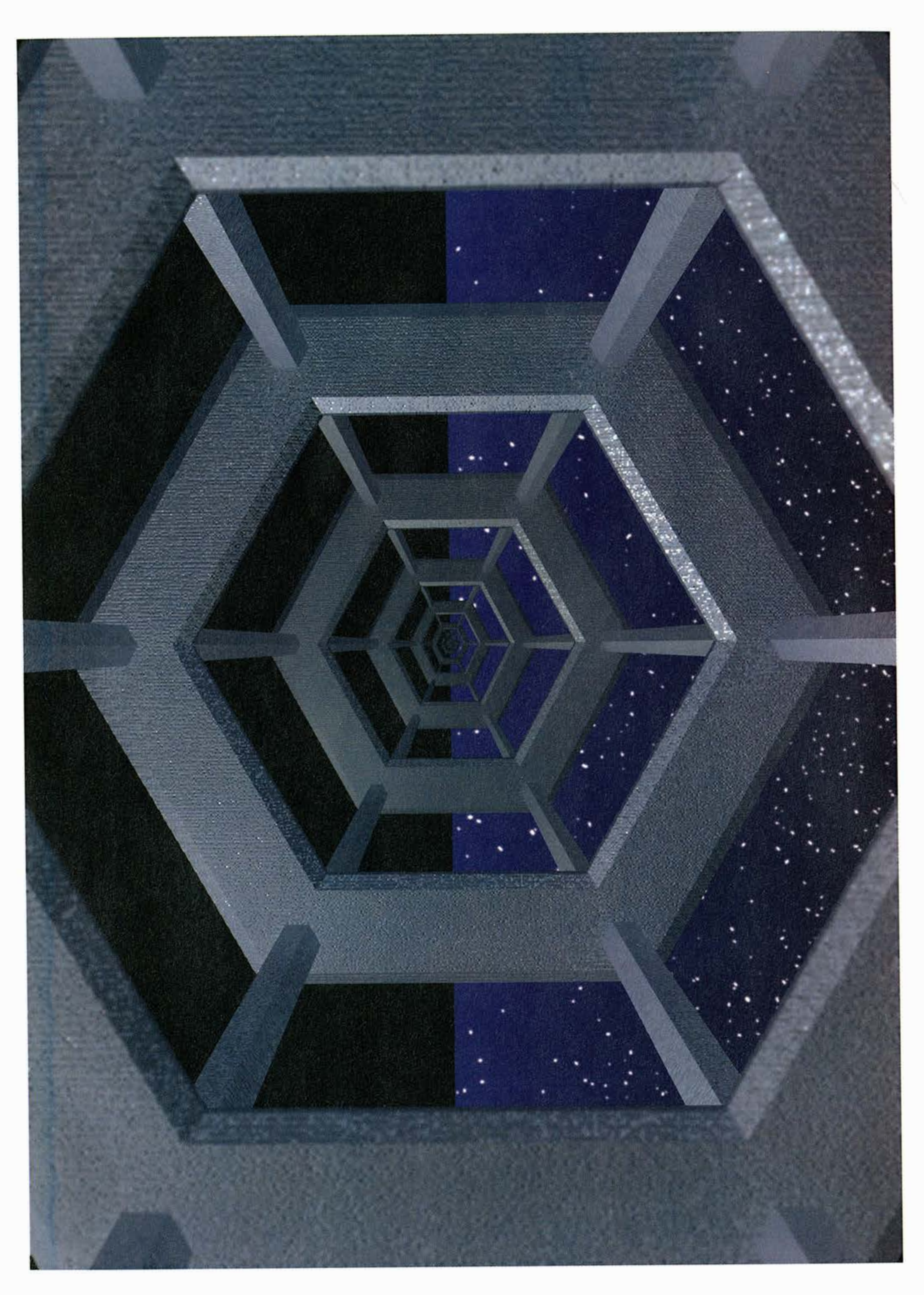
Aquello nos pareció carente de sentido. Según la dinámica elemental, la fuerza centrífuga depende de la velocidad orbital, mientras que la gravitatoria no. Por tanto, la fuerza total —suma de las fuerzas centrífuga y gravitatoria— debería depender también de la velocidad orbital. Al no ofrecernos la respuesta que esperábamos, supusimos que la fórmula no era correcta. Pero lo era.

No hay verdaderas paradojas en física. Alguna veces un fenómeno nos puede parecer paradójico debido a la inercia de nuestra mente: nos basamos en una imagen incompleta que nos impide entender cómo funcionan realmente las cosas. Lasota y yo nos dimos cuenta de que el movimiento a lo largo de la trayectoria de un rayo circular nos parece tan paradójico porque nos cuesta aceptar el hecho de que, aunque el rayo en cuestión sea en verdad circular, también es, en cierto sentido, perfectamente recto.

A fin de desarrollar la correcta intuición acerca de los rayos de luz circulares, imaginemos dos astronau-

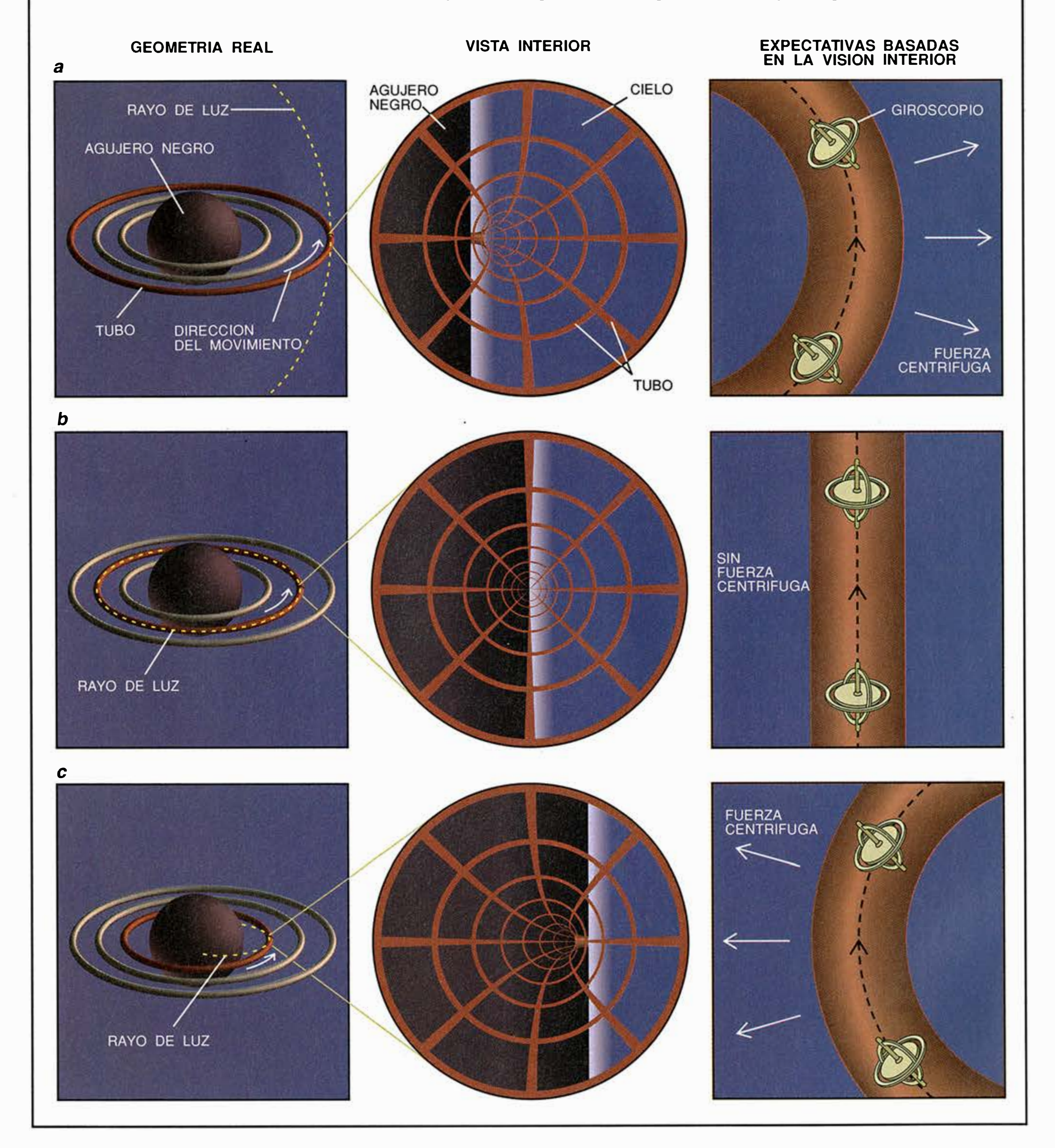
1. ESTRUCTURA ESPACIAL construida con vigas y nervios hexagonales alrededor de un agujero negro esférico a una altitud igual a 1,5 veces el radio del agujero. Aunque la estructura se curva alrededor del agujero, le parecería, sin embargo, recta a un observador que estuviera en el interior. El efecto se debe al campo gravitatorio del agujero, que a esta precisa altitud es tan intenso que los rayos de luz viajan en círculos perfectos alrededor del agujero. Además, un observador que viajase alrededor del agujero por dentro de esta estructura no experimentaría fuerza centrífuga. La pequeña distorsión de los nervios hexagonales distantes es otra consecuencia de la curvatura de la luz.

MAREK ARTUR ABRAMOWICZ es catedrático del departamento de astrofísica de la Universidad de Göteborg. En 1974 obtuvo su doctorado en física teórica por la Universidad de Varsovia. Durante más de una década, ha colaborado con Dennis Sciama en Oxford y Trieste.



Fuerzas centrífugas cerca de un agujero negro

Un observador ve de lejos tres tubos circulares alrededor de un agujero negro; dentro de ellos, le parecería que tendrían otra forma. El primer tubo (*a*) está lejos del agujero, donde los rayos de luz son casi rectos: el observador alejado y el del interior verían el tubo curvado alrededor del agujero, y ambos predecirían correctamente que un objeto que viajara por dentro del tubo sería empujado hacia fuera, por la fuerza centrífuga; un giroscopio que se moviese por el tubo sufriría, por la fuerza centrífuga, precesión. El segundo tubo (*b*) está construido alrededor de la región del espacio donde los rayos se curvan formando círculos por la acción del campo gravitatorio del agujero negro. Debido a la curvatura de los rayos, el observador del interior del tubo lo vería recto, y predeciría correctamente que no habría fuerza centrífuga. El tercer tubo (*c*) se halla cerca del agujero negro. En este caso, los rayos de luz están tan curvados que el tubo parece que, a su vez, se curva, separándose del agujero. El observador del interior del tubo predeciría correctamente que la fuerza centrífuga empujaría el objeto hacia dentro, y provocaría la precesión del giroscopio.



tas (digamos, Juan y Alicia) que llevan a cabo experimentos dentro de una estación espacial de forma tubular, construida alrededor de un agujero negro de manera tal que su eje y el camino del rayo circular coincidan. Los astronautas saben que el eje del tubo es circular: Juan ha medido la curvatura de las paredes a lo largo del tubo usando reglas rectas. Sin embargo, a causa de la curvatura de los rayos de luz, ¡a Juan y Alicia les parece visualmente que el tubo es perfectamente recto!

Imaginemos que Alicia sujeta una linterna al tubo de forma que quede en el centro. Echa a andar por el tubo alejándose del foco. Para Alicia, la linterna no deja nunca de estar en el centro, y la curvatura del pasillo no se la va ocultando. Donde sea que esté, la luz de la lámpara llega hasta ella por la misma trayectoria circular. Si Alicia mira hacia atrás, ve que la lámpara va debilitándose progresivamente a medida que se aleja más y más, y si mira hacia delante, ve que se hace progresivamente más brillante. De hecho, la luz de la lámpara circula a lo largo del tubo muchas veces, así que Alicia ve múltiples imágenes de la lámpara.

Aunque Alicia podría tener algunas dificultades para explicar por qué la lámpara aparece detrás y delante suyo, y aunque las múltiples imágenes quizá la confundan, deberá concluir que el tubo es recto porque sus paredes nunca tapan la lámpara. Juzgando por lo que ella ve, por tanto, no esperaría que ningún efecto centrífugo actuara sobre los objetos que se movieran dentro del tubo. Deduciría que la fuerza centrífuga sería nula. Supondría también que la única fuerza que actúa sobre los objetos en el interior del tubo es la gravitatoria, que no depende de la velocidad orbital. Alicia lleva a cabo predicciones exactas basándose en lo que de hecho ve. Llamaré a esto el principio de ver-es-creer.

El significado real del principio se me escapó hasta 1985. Di una charla informal sobre la paradoja de los rayos de luz circulares en el Instituto de Física Teórica de Santa Bárbara en California. Tuve la fortuna de dirigirme a varios expertos en la teoría de la relatividad, entre ellos Brandon Carter, del Observatorio de París. Al día siguiente, Carter aportó una idea brillante: si un objeto se mueve con velocidad constante a lo largo de la trayectoria de cualquier rayo de luz —circular, curvado o recto— la fuerza que lo mantiene en movimiento no dependerá de cuán rápidamente se mueva. Por supuesto, aunque el objeto siga el camino de un rayo de luz en el espacio, lo hará a una velocidad menor que la de la luz.

Por ejemplo, si un cohete tuviera que seguir la trayectoria de un rayo de luz que pasara por delante del Sol, debería girar paulatinamente menos de una centésima de grado. Para mantenerse en movimiento a una velocidad constante, debería poner en marcha cohetes secundarios en una dirección perpendicular a su trayectoria. Pero la fuerza que los cohetes secundarios necesitarían ejercer no dependería de cuán rápido se estuviera moviendo el cohete.

Carter sugirió que el principio de ver-es-creer debería ser válido en todas partes, en cualquier campo gravitatorio. En otras palabras, si un objeto viajara a velocidad constante a lo largo de la trayectoria de un rayo de luz curvado por algún campo gravitatorio, se comportaría como si estuviera viajando en línea recta. Carter, Lasota y yo demostramos más tarde que esta suposición era correcta siempre que el campo gravitatorio asociado no cambiara con el tiempo. Desarrollamos el concepto de geometría óptica, que proporciona un marco muy útil para comprender el comportamiento dinámico de objetos en campos gravitatorios intensos. Más tarde, John C. Miller, del Observatorio Astronómico de Trieste, y Zdenk Stuchlík, de la Universidad Silesiana de Opava, descubrieron algunas relaciones básicas entre dinámica y geometría en este contexto, y Norbert Wex, del Instituto Max Planck de Física y Astrofísica de Munich, sugirieron una manera elegante e inteligente de adaptar la geometría óptica a los agujeros negros en rotación.

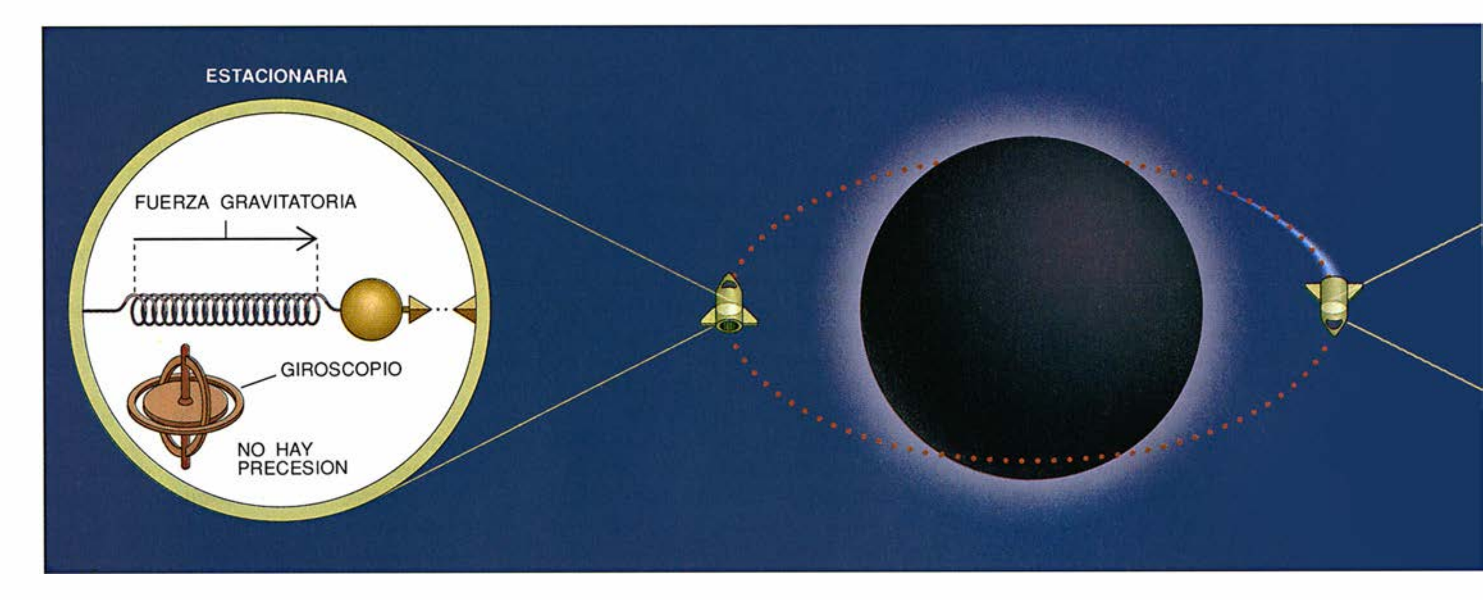
La geometría convencional del espacio se basa en medidas realizadas con reglas rectas corrientes, que definen la unidad de longitud. La geometría óptica, por su parte, depende de medidas realizadas con señales luminosas.

En la geometría convencional, se puede medir la longitud de una curva contando cuántas reglas caben a lo largo de la misma. La distancia entre dos puntos del espacio puede entonces definirse como la longitud de la curva más corta que los une. Esta curva más corta se conoce como geodésica. Si se realizan medidas en un espacio plano o, lo que es equivalente, en un espacio libre de campos gravitatorios, la curva más corta, o geodésica, entre dos puntos es una línea recta.

En la geometría óptica la distancia entre dos puntos del espacio se define como la mitad del tiempo que tarda la luz en ir de un punto a otro y volver. El tiempo se mide mediante un reloj situado en el primer punto. En un espacio libre de campos gravitatorios, la geometría óptica es exactamente la misma que la geometría convencional porque tanto los rayos de luz como las geodésicas son rectas. Así, en este caso, la geometría del espacio determina la trayectoria de los rayos de luz.

Según la teoría de la relatividad general de Einstein, las tres dimensiones del espacio y la dimensión del tiempo forman conjuntamente un espacio-tiempo cuadridimensional. En cualquier espacio-tiempo, con o sin campo gravitatorio, la luz se mueve siempre a lo largo de geodésicas, y por tanto sigue el camino que le marca la geometría del espacio-tiempo. En un espacio deformado por un campo gravitatorio, sin embargo, los rayos luminosos están curvados y en general no coinciden con las geodésicas en el sentido explicado anteriormente. Así pues, en el caso general, la geometría del espacio no determina la trayectoria de los rayos de luz.

La geometría óptica restablece la conexión entre la geometría del espacio y las trayectorias de los rayos de luz mediante el cambio de la escala de todas las distancias "verdaderas" (esto es, las medidas realizadas con reglas rectas). La aplicación de la geometría óptica es similar, en muchos aspectos, al procedimiento seguido al hacer un mapa plano de un globo redondo. La geometría óptica es una manera de hacer mapas convenientes de un espacio curvo, pero tiene algunas de las mismas dificultades que encuentra la cartografía convencional: un globo no puede representarse mediante un mapa plano sin que medie algún tipo de distorsión. Lo mismo en la cartografía convencional que en la geometría óptica, una representación puede minimizar las aberraciones de ciertos aspectos mientras distorsiona otros hasta hacer imposible su reconocimiento. La elección de la representación viene determinada por el motivo que lleve a hacer el mapa. Por ejemplo, la conocida proyección Mercator exagera las regiones polares, pero no tiene precio para los navegantes, ya que muestra todas las líneas de dirección constante como líneas rectas. De forma parecida, la geometría óptica, aunque distorsiona las distancias verdaderas, reviste particular interés para estudiar la propagación de la



2. DOS NAVES ESPACIALES en la misma órbita alrededor de un agujero negro sirven para medir la fuerza centrífuga. Cada nave espacial tiene un giroscopio y un peso que cuelga de un muelle. Cada una maniobra de manera que el peso apunte hacia una señal marcada en el casco. Una de las naves espaciales ajusta su velocidad orbital a cero, con lo que cesa la precesión del giroscopio; la fuerza centrífuga en el muelle entonces es cero, y la fuerza total, pues, igual a la gravitatoria. La otra

luz y la dinámica, pues los rayos de luz son geodésicas en el mapa que proporciona la geometría óptica (al menos siempre que el campo gravitatorio no cambie con el tiempo y su fuente material no gire.) Así, aunque la propagación de la luz y la dinámica no estén relacionadas en la geometría convencional del espacio, lo están en la geometría óptica.

El cambio de escala utilizado por la geometría óptica es un ejemplo de un procedimiento matemático empleado en la teoría de la relatividad y técnicamente conocido como transformación conforme. El cambio de escala endereza los rayos de luz curvados, de manera que aparezcan como geodésicas en la geometría óptica.

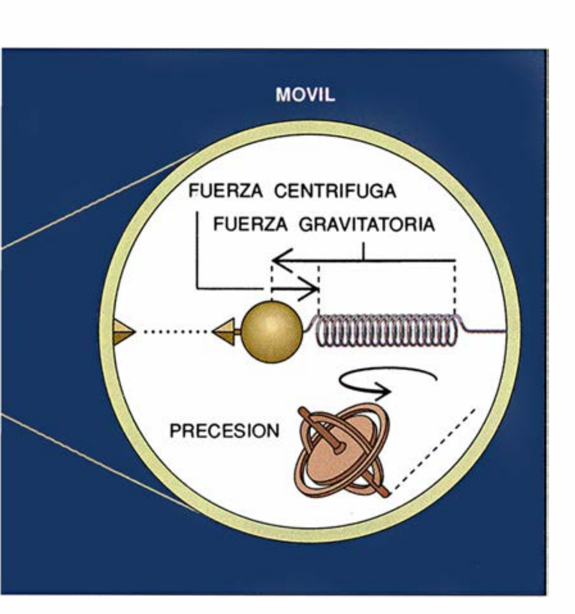
Aplicando la geometría óptica, los físicos pueden dejar a un lado problemas técnicos impuestos por la curvatura del espacio y concentrarse en los problemas físicos básicos. Este tipo de transformación conforme nos permite entender la dinámica en espacios curvos de manera intuitiva. La dinámica siempre está de acuerdo con lo que se ve. La geometría óptica explica el comportamiento aparentemente paradójico de los objetos que se mueven a lo largo de la trayectoria de un rayo de luz circular.

Puede que el resultado general más importante obtenido con la ayuda de la geometría óptica sea que, en ciertas situaciones, el espacio parece estar vuelto al revés. Me di cuenta de esto leyendo una publicación de Malcolm Anderson y José P. S. Lemos, becarios de investigación de Donald Lynden-Bell, de la Universidad de Cambridge. Anderson y Lemos demostraban que, si una nube de gas viaja en una órbita muy cercana a un agujero negro, las tensiones viscosas de la nube transfieren momento angular hacia dentro. Descubrimiento harto extraño, porque de ordinario las tensiones viscosas transfieren momento angular hacia fuera.

En efecto, la transferencia hacia fuera de momento angular por medio de una tensión viscosa es un principio de importancia fundamental en astrofísica. Ayuda a explicar la razón por la que una nube de gas (un disco de acreción) que orbita en torno a un agujero negro central suministra la energía que alimenta los núcleos activos de algunas galaxias. La tensión viscosa tiende a hacer que la rotación del disco de acreción sea más rígida, frenando por tanto la parte interior del disco que gira rápidamente y acelerando la parte exterior, que rota despacio. De este modo, el momento angular se conduce hacia fuera.

Anderson y Lemos descubrieron que la tensión viscosa puede transportar momento angular hacia dentro, pero no pudieron razonar el motivo. Tras leer su trabajo, caí en la cuenta de que la geometría óptica sugiere una potente explicación del efecto y de varios resultados similares, no menos sorprendentes. Encontré que el espacio cercano al agujero negro se vuelve al revés; la dirección hacia fuera que definen las reglas rectas es directamente opuesta a la dirección hacia fuera definida por los rayos de luz. En la situación descrita por Anderson y Lemos, el momento angular se transporta hacia fuera, como debe ser, pero "hacia fuera" ha de entenderse siempre en el sentido de la geometría óptica. Cuando se está lejos de un agujero negro, y no a otra cosa estamos acostumbrados, la dirección hacia fuera de la geometría convencional coincide con la definida por la geometría óptica. Pero cerca del agujero estas dos direcciones son opuestas, de suerte que el momento angular es transportado hacia dentro con respecto a la geometría convencional, cosa que parece paradójica.

Para comprender por qué esto es así, pensemos otra vez en una estación espacial circular tendida en torno a un agujero negro, sólo que ahora la estación no se construirá alrededor del rayo circular de luz, sino alrededor de un círculo menor, centrado en el agujero negro. Juan mide las distancias verdaderas mediante una regla recta corriente; Alicia usa, en cambio, señales luminosas. Por conveniencia, supongamos que Juan y Alicia siempre miran a lo largo del tubo dejando el agujero negro a su izquierda. Con su regla corriente, Juan encuentra que el tubo se curva hacia la izquierda. Y, en efecto, sus medidas están de acuerdo con la geometría real; le bastaría tocar el tubo con sus manos para experimentar que las paredes se curvan hacia la izquierda. Concluiría que la



nave viaja a cualquier velocidad. La fuerza centrífuga en su muelle se deduce midiendo su tensión y comparando el resultado con el de la segunda nave.

dirección hacia fuera es la dirección hacia la derecha.

Juan sabe por la experiencia diaria que la fuerza centrífuga empuja en dirección hacia fuera. Podría entonces predecir que debería empujar los objetos hacia la derecha. De manera similar, supondría que las tensiones viscosas transportan el momento angular hacia la derecha. Pero la verdad es exactamente la opuesta.

Alicia realiza un conjunto distinto de mediciones, basadas en lo que realmente ve, y llega a la conclusión correcta. Pide a Juan que camine alejándose de ella, sosteniendo una linterna de forma que se mueva a lo largo del eje del tubo. Si el campo gravitatorio no curvase los rayos de luz (es decir, si los rayos fueran rectos), la lámpara desaparecería por la parte izquierda del tubo, y Alicia concluiría que el tubo estaba curvado hacia la izquierda. Si los rayos fueran circulares, la lámpara no desaparecería; daría la impresión de que el tubo es recto. Pero el tubo está tan cerca del agujero negro, que los rayos de luz se curvan incluso más que los rayos circulares. Por tanto, Alicia ve que la lámpara desaparece por la derecha y concluye que el tubo se curva hacia dicho lado. Así, predice que la fuerza centrífuga empuja hacia la izquierda y que la tensión viscosa transporta momento angular hacia la izquierda. Sus predicciones son correctas, como garantiza el principio de ver-es-creer. Observemos que, según la geometría convencional, dentro del tubo la fuerza centrífuga atrae hacia el centro del movimiento circular.

A lo largo de los últimos años, la geometría óptica se ha venido aplicando con éxito a varios problemas astrofísicos relacionados con el comportamiento de la materia en rotación en campos gravitatorios intensos. Los dos problemas centrales de este tipo son el colapso gravitatorio de estrellas giratorias y la fusión de dos estrellas de neutrones, objetos densísimos.

John Miller y yo hemos demostrado que la geometría óptica puede ser muy útil para afrontar estos problemas. Conforme a la teoría no relativista, se esperaría que un cuerpo gaseoso en rotación que se comprimiese conservando su masa y su momento angular debería hacerse progresivamente más plano. Sin embargo, en 1974 Subrahmanyan Chandrasekhar, de la Universidad de Chicago, y Miller, entonces en la Universidad de Oxford, encontraron que, según la teoría de Einstein, en las últimas etapas de la contracción, cuando el campo gravitatorio es muy intenso, cesa la tendencia a aplanarse y la estrella en rotación se torna más esférica. Miller y yo hemos explicado este efecto gracias a la geometría óptica y a haber tenido en cuenta el carácter insólito de la fuerza centrífuga en un campo gravitatorio intenso.

No me ha sido fácil convencer a mis colegas de que la inversión de la fuerza centrífuga es un efecto físico real. El problema estribaba en cómo se definía y medía la fuerza centrífuga en un espacio muy curvado. Nada me hizo progresar más que las cuestiones que me planteaba Fernando de Felice, de la Universidad de Turín. Como resultado de mis amigables batallas con él, he llegado a una peculiar definición de la fuerza centrífuga. Hay otras, pero entiendo que son menos útiles y no tan convincentes.

A fin de medir la fuerza centrífuga, imagino dos naves espaciales que viajan en la misma órbita alrededor de un agujero negro. Juan pilota una nave y Alicia la otra. Cada nave espacial lleva un equipamiento que consta de dos piezas: un giroscopio y un peso que cuelga de un muelle. Midiendo su longitud, Juan y Alicia pueden determinar la tensión del muelle. La tensión, a su vez, es igual a la suma de las dos fuerzas que actúan en el peso: la fuerza gravitatoria y la fuerza centrífuga.

Para medir solamente una cualquiera de estas fuerzas, Juan y Alicia deben cambiar la orientación de sus naves espaciales mientras orbitan el agujero negro; deben girar de manera que el muelle estirado apunte siempre hacia una señal marcada en el casco de la nave. La dirección del muelle está por tanto fijada en ésta, pero no en el espacio. Por otro lado, el giroscopio de cada nave apunta siempre hacia una dirección fija en el espacio, y, por tanto, a medida que la nave se vaya moviendo por su órbita, sufrirá una precesión en relación a la dirección del muelle.

Para medir la fuerza gravitatoria, Juan hace parar su nave; sabe cuándo ha parado porque cesa la precesión de su giroscopio, y concluye, por ello, que en ese momento la fuerza que alarga el muelle es sólo la gravitatoria. Comunica su resultado a Alicia, que sigue viajando alrededor del agujero negro en la misma órbita. Alicia mide la fuerza total que alarga su muelle y calcula la fuerza centrífuga sustrayendo de aquélla la fuerza gravitatoria que Juan ha medido. Este método de medición de la fuerza centrífuga parece complicado, pero tiene la ventaja de ser exactamente el mismo en campos gravitatorios débiles y fuertes.

La geometría óptica proporciona una manera adecuada de atacar problemas difíciles de relatividad general; de ahí su valor práctico. Es también útil pedagógicamente.

Y en un nivel más básico, nos muestra que los conceptos de "hacia dentro" y "hacia fuera" no son absolutos en espacios deformados por campos gravitatorios intensos. En otros tiempos se creía que las nociones de arriba y abajo, incluso las de izquierda y derecha, eran absolutas. Quizá dentro de unos años no haya quien se sorprenda de que la distinción de dentro y fuera sea, en realidad, tan relativa como aquéllas que a nuestros antepasados les parecían absolutas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ON TRAVELLING ROUND WITHOUT FEELING IT AND UNCURVING CURVES. M. A. Abramowicz y J.-P. Lasota en *American Journal of Physics*, vol. 54, págs. 936-939; octubre de 1986.

REVERSING CENTRIFUGAL FORCES. Bruce Allen en *Nature*, vol. 347, n.º 6294, págs. 615-616; 18 de octubre de 1990.

RELATIVITY OF INWARDS AND OUTWARDS: AN EXAMPLE. M. A. Abramowicz en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 256, n.º 4, págs. 710-718; 15 de junio de 1992.

THE WALL OF DEATH. M. A. Abramowicz y E. Szuszkiewicz en *American Journal of Physics* (en prensa).

Inmunoterapia contra el cáncer

Ciertas moléculas de los tumores se convierten en objetivo de ataque para células especiales del sistema inmunitario. Estos antígenos de rechazo tumoral pueden proporcionar la base para el desarrollo de una eficaz terapia anticancerosa

Thierry Boon

En plenitud de facultades, el sistema inmunitario es el arma ideal contra las enfermedades infecciosas. Elimina virus y bacterias que invaden el organismo y mata las células infectadas, sin molestar al tejido sano. El sistema puede comportarse con semejante precisión porque responde sólo ante la presencia de antígenos, moléculas o sus fragmentos que pertenecen a los invasores foráneos. En general, las moléculas de los anticuerpos inactivan toxinas y agentes patógenos que circulan por los líquidos del organismo, mientras que ciertos leucocitos, los linfocitos *T* citolíticos, destruyen ("lisan") las células en las que han penetrado los virus.

La especifidad y potencia del sistema inmunitario no han pasado inadvertidas para la ciencia. Apoyados en la esperanza de conseguir que los linfocitos *T* atacaran las células cancerosas hasta su erradicación como si fueran células infectadas por virus, los investigadores venían trabajando en la identificación de antígenos de rechazo tumoral, estructuras cuya presencia en las células cancerosas pudieran advertir los linfocitos *T*. Suponíase que los antígenos, que de manera exclusiva (o casi exclusiva) aparecerían en las células cancerosas, podrían manipularse hasta despertar o avivar una reacción inmunitaria deficiente contra tales objetivos.

La prueba definitiva de la existencia de antígenos de rechazo tumoral se había presentado siempre escurridiza. Pero en los últimos años, en el Instituto Ludwig de Investigaciones Oncológicas, en Bruselas, hemos obtenido datos inequívocos de que muchos tumores, tal vez la mayoría de ellos, manifiestan este tipo de antígenos. De interés parejo ha resultado la creación de un método de aislar genes que especifican las estructuras de estos antígenos. A esos dos logros obtenidos por mi equipo hemos de agregar el descubrimiento, compartido por otros, de indicios claros que apoyan la idea según la cual los linfocitos *T*, pasivos de ordinario ante la presencia de antígenos de rechazo tumoral, pueden ser incitados a responder a su estímulo. De ahí que el diseño de terapias encaminadas a generar la respuesta de las células *T* contra antígenos de rechazo tumoral bien definidos se haya convertido en algo viable.

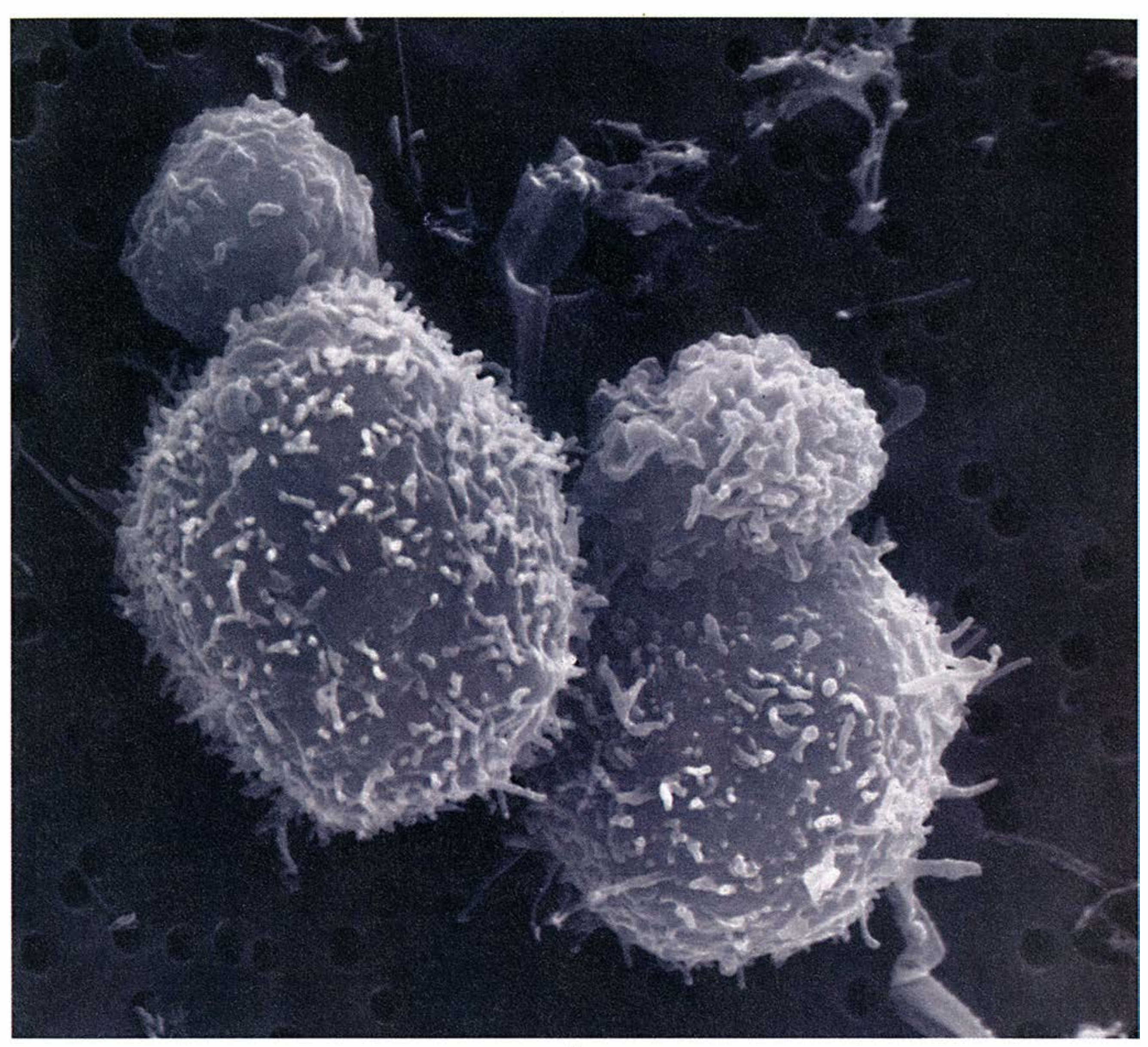
THIERRY BOON, director del Instituto Ludwig de Investigaciones Oncológicas, es profesor de genética e inmunología en la Universidad Católica de Lovaina desde 1980. Se formó en la Universidad Rockefeller y en el Instituto Pasteur de París.

Las primeras pistas de que los tumores producen antígenos de rechazo tumoral se obtuvieron en los años cincuenta, antes de conocerse las distintas funciones de anticuerpos y células *T*. E. J. Foley, de la Schering Corporation, Richmond T. Prehn y Joan M. Main, del Instituto Nacional del Cáncer, y George Klein, del Instituto Karolinska de Estocolmo, habían provocado tumores en ratones con dosis muy altas de cierto carcinógeno. La extirpación quirúrgica de los mismos y su inyección posterior en el animal no comportaba recidivas; sí aparecía el cáncer cuando la célula inyectada procedía de otros tumores. De ello cabía inferir que las células de los tumores inducidos por el agente carcinógeno portan antígenos capaces de despertar una respuesta por parte del sistema inmunitario.

Pasaron veinte años en que se mantuvo viva la esperanza de que también en el hombre los tumores presentaran antígenos de rechazo tumoral. La posibilidad de una terapia basada en los antígenos se consolidó, una vez reconocida la importancia de los linfocitos *T* para limpiar al organismo de células anormales. Jean-Charles Cerottini y K. Theodor Brunner, del Instituto Suizo de Investigación Experimental sobre el Cáncer en Lausana, demostraron que, cuando los ratones rechazan el injerto de tejido de un donante no emparentado, producen linfocitos *T* citolíticos que destruyen las células del trasplante. Para entonces ya estaba claro que la unión de los receptores antigénicos de los linfocitos *T* citolíticos a los antígenos foráneos de una célula implicaba que estos leucocitos no sólo lisaban la célula, sino que, además, se multiplicaban, redoblando así la reacción inmunitaria. De todo ello deducíase que el mejor camino para avanzar consistía en abordar los objetivos antigénicos de los linfocitos *T* y avivar la actividad de las células citolíticas.

A mediados de los años setenta, los experimentos de Harold B. Hewitt, entonces en el Hospital Mount Vernon de Londres, cayeron como un jarro de agua fría. En vez de analizar los tumores inducidos por dosis masivas de agentes carcinogénicos, Hewitt buscó datos que apoyaran la existencia de antígenos de rechazo tumoral en lesiones malignas espontáneas. Los resultados de su trabajo minucioso, realizados con muchos tipos de cáncer, sugerían que los tumores espontáneos de los mamíferos no evocaban ningún rechazo inmunitario. Por tanto, las observaciones de estudios precedentes carecían de interés para los tumores humanos; raramente la población estará expuesta a niveles de carcinógenos similares a los creados en inducciones malignas experimentales.

Muchos dirigieron entonces su atención hacía otras áreas. Pero entre 1972 y 1976 mi equipo fue recogiendo datos que abonaban la presencia de antígenos de rechazo tumoral en tumores que no despertaban una respuesta inmunitaria. Descubrimos también que ciertos antígenos, en un principio ineficaces, se convertían en objetivo claro del asalto defensivo si se alertaba, de su presencia, al siste-



1. LEUCOCITOS pertenecientes a la familia de los linfocitos *T* (*esferas pequeñas*) que atacan a dos células de un tumor murino, el P815 (*macroesferas*). Estos linfocitos se adhieren a las células tumorales cuando reconocen sus objetivos específicos, los antígenos de rechazo tumoral, en la superficie celular. Se puede ya identificar los antígenos con absoluta seguridad y se confía emplearlos en terapias que inciten a los linfocitos *T* del paciente a eliminar sus tumores.

ma inmunitario. Eso explica que nosotros siguiéramos, pese a los informes de Hewitt, creyendo en una inmunoterapia humana basada en los antígenos de rechazo tumoral.

En 1972 lo que en verdad nos interesaba era identificar los genes que controlan la diferenciación histológica de las células embrionarias. Odile Kellermann, entonces en el Instituto Pasteur de París, y yo habíamos expuesto un cultivo de células tumorales de ratón a un potente agente mutagénico, un compuesto que introduce de manera aleatoria cambios permanentes (mutaciones) en los genes. Separamos, luego, una a una las células tratadas y las colocamos en sendas placas de plástico, dejándolas que proliferasen y crearan, cada una, poblaciones de células idénticas (un clon). Hecho esto, transferíamos las poblaciones clónicas a ratones, y examinábamos los tipos celulares presentes en los tumores resultantes.

El resultado del experimento no nos ayudó a entender mejor los mecanismos de la diferenciación, pero puso de manifiesto un curiosísimo fenómeno. Las células tumorales originales, o células madre (las que aún no habían estado expuestas al agente mutagénico), daban lugar casi siempre a tumores de naturaleza cancerosa cuando se inyectaban en los ratones, en tanto que muchos clones tratados con los mutágenos no originaban lesiones malignas. ¿Por qué las células tratadas con el mutágeno no producían tumores? Por mor de sencillez, llamaremos variantes tum$^-$ a los clones celulares que no generaron tumores.

Nos encontramos con que las variantes tum$^-$ no provocaban cáncer porque el sistema inmunitario de los ratones inyectados las había destruido, de una manera semejante a lo que ocurre en el rechazo de un riñón trasplantado. Supimos también que el rechazo se producía porque el mutágeno inducía la aparición en las células tum$^-$ de uno o varios antígenos (antígenos tum$^-$) que desencadenaban una vigorosa respuesta de los linfocitos *T;* esos antígenos tum$^-$, ausentes en la línea de las células madre produc-

toras de tumores (tumorógenas), divergían para cada variante tum^{-}.

La importancia obvia de tales resultados palideció a mi vista con otro hallazgo, que obtuve con Aline Van Pel, en el Instituto de Patología Celular y Molecular (ICP) de Bruselas. A imagen de las neoplasias espontáneas estudiadas por Hewitt, las células de nuestro tumor original eran incapaces de provocar el ataque inmunitario. A menudo, cuando inyectábamos esas células en ratones que habían rechazado una variante u otra de tum^{-}, no desarrollaban el cáncer. Al montar una respuesta inmune a una variante tum^{-}, los ratones adquirieron resistencia a la célula del tumor original. Sin embargo, estos mismos ratones no frenaban el desarrollo de otros tipos de cáncer, prueba de que el rechazo de las células tumorales originales se debía a un antígeno que compartían la célula madre y la variante tum^{-}, pero no otros tumores.

Varios estudios de seguimiento de muchos tipos de tumores murinos confirmaron nuestros hallazgos. Y lo que revestía mayor interés, Van Pel observó que podía reproducir nuestros resultados con los mismos tumores espontáneos que Hewitt había examinado. Quedaba claro, por tanto, que había que plantearse de nuevo la idea de que el cáncer espontáneo carece de antígenos de rechazo tumoral.

Nadie ha ofrecido una explicación cabal del mecanismo en virtud del cual las variantes tum^{-} desencadenan una respuesta inmunitaria tan potente ante los antígenos, inicialmente ineficaces o muy débiles, de las células originales. Sospechamos de la intervención de las interleucinas en la reacción, liberadas por un linfocito que se ha unido a un antígeno. Estas proteínas, a su vez, promueven la proliferación del linfocito en cuestión y de cuantos merodean cerca (como los que se encuentran unidos a otro antígeno en la misma célula tumoral o en las células vecinas). Parece probable que los antígenos tum^{-} encierren capacidad suficiente para estimular a los linfocitos *T* incitándolos a matar a las células tum^{-} y a multiplicarse rápidamente incluso en la ausencia de interleucinas preexistentes en el entorno inmediato. Estos linfocitos pueden producir entonces interleucinas, que ayuden a otras células *T* a que se tornen activas ante la presencia de antígenos de rechazo tumoral débiles. Esta idea es congruente con el hecho de que varios grupos de investigadores hayan conseguido modificar células tumorales haciéndolas segregar interleucinas. En muchos casos se ha observado un aumento considerable de la respuesta inmunitaria frente a los tumores.

Los datos de los que disponíamos ya en los primeros ochenta nos llevaban a sugerir la siguiente conclusión: los tumores murinos, incapaces de despertar un aumento de la población de linfocitos *T*, suelen portar, sin embargo, antígenos débiles, que pueden convertirlos en objetivos de un eficaz asalto inmunitario. Dada la estrecha similaridad entre el sistema inmunitario del ratón y el humano, tales resultados movían a pensar si no serían también antigénicos los tumores del hombre. De ahí a la inmunoterapia anticancerosa no habría más que un paso. Congregamos, pues, todas nuestras fuerzas en los antígenos del rechazo tumoral.

Antes de abordar la terapia, debíamos identificar los antígenos de rechazo tumoral específicos. Todos los intentos anteriores por aislar estas estructuras directamente, a partir de las membranas celulares, en tumores murinos o humanos habían fracasado. Optamos entonces por aplicar un enfoque distinto: clonar, o aislar, los genes que dirigen la construcción de los antígenos. Nadie había resuelto bien el problema. Estábamos en 1983, en el Instituto Ludwig, cuando nos dispusimos a desarrollar un método propio. Cuatro años tardamos en preparar un protocolo que funcionara en un sistema analítico.

En nuestro primer clonado satisfactorio aislamos el gen del antígeno tum^{-} que aparece en la células de una variante tum^{-} murina. Por supuesto, los antígenos tum^{-} no son verdaderos antígenos de rechazo tumoral, porque nacen de una inducción artificial en células de cultivo, y no están presentes en las neoplasias del organismo. Pero, como veremos después, nos fueron de gran utilidad en el desarrollo de nuestras pruebas. Generamos la variante tum^{-} a partir de una línea celular derivada de un mastocitoma (tumor de células cebadas) conocida como P815. La línea celular P815 original se adaptaba a nuestro propósito, porque las células se replican rápida e indefinidamente en el tubo de ensayo. Además, las variantes tum^{-} de las células P815 provocan una intensa respuesta, fácilmente detectable, por parte de los linfocitos *T* citolíticos.

Para llevar a cabo nuestro plan de clonado de genes debíamos contar con un buen suministro de células *T* citolíticas reactivas ante el antígeno tum^{-} de la variante. Las células *T* nos llevarían hasta el gen del antígeno. Para conseguir las células citolíticas, inyectamos la variante tum^{-} P815 en ratones. Después extirpamos el bazo (un repositorio de linfocitos) de los animales que habían rechazado la variante. Sabíamos que, si los linfocitos de estos animales inmunizados se exponían a células muertas correspondientes a la variante, los linfocitos *T* citolíticos específicos para la variante se multiplicarían; otros linfocitos desaparecerían. (Las células tumorales se aniquilarían para evitar que dominaran el cultivo.) Una vez realizado el cultivo, disponíamos de un suministro de linfocitos T citotóxicos, algunos de los cuales respondían a los antígenos tum^{-} y otros a los antígenos de rechazo tumoral presentes en todas las células P815. Después de colocar linfocitos individuales en placas de petri, permitiéndoles que se dividieran por separado, obtuvimos varios clones que lisaban sólo la variante tum^{-} y que podíamos hacer crecer *in vitro*. Elegimos uno de los clones dirigido contra el antígeno tum^{-} para usarlo en la búsqueda del gen.

En resumen, el plan de aislamiento del gen del antígeno tum^{-} era bastante directo. Intentaríamos recoger todo el material genético de la variante. El siguiente paso consistiría en unir los fragmentos de este ADN a trozos de ADN bacteriano, que servirían de etiquetas por las que guiarnos para recuperar el gen de interés. Introduciríamos los fragmentos en las células que no producen el antígeno tum^{-}. Determinaríamos la capacidad de cada célula para estimular el clon de nuestros linfocitos *T*. Sabríamos que una célula receptora presentaría el antígeno (lo que indicaría que habría incorporado el gen corrrespondiente) si la célula provocaba la proliferación de los linfocitos. Buscando la etiqueta bacteriana que habíamos enganchado al ADN de la variante tum^{-}, localizaríamos y recuperaríamos del ADN de la célula receptora el gen determinante del antígeno tum^{-}.

Pese a la sencillez conceptual del plan, la realización resultó bastante laboriosa. Las células de mamíferos contienen unos 100.000 genes, extendidos a lo largo de unos tres mil millones de nucleótidos (unidades estructurales del ADN) en los cromosomas heredados de los padres. Debido a las limitaciones de las técnicas disponibles para la inserción del ADN en las células receptoras, tuvimos que crear nuestra propia "genoteca" con millones de copias de cada gen, creadas cortando fragmentos del ADN de la variante tum^{-} y empal-

mándolos en 300.000 plásmidos, o trozos circulares de ADN bacteriano; cada plásmido portaba alrededor de 40.000 nucleótidos del ADN tum$^-$ (con un contenido medio de uno o dos genes). Después de dejar que se multiplicasen los plásmidos en las bacterias, recuperamos el ADN.

Seleccionamos, por célula receptora, una que pudiera incorporar este tipo de plásmidos en sus cromosomas. La línea original P815 resultó adecuada. Para asegurar que al menos una copia de cada gen en la variante tum$^-$ quedara encajada en el ADN de las células receptoras P815, mezclamos los plásmidos recuperados con más de 300 millones de células P815. Necesitábamos tantas porque sabíamos que sólo alrededor de una de cada 10.000 células podría captar el ADN. También sabíamos que este número, ya escaso, de células aceptaría un lote de ADN constituido por una media de 500.000 nucleótidos.

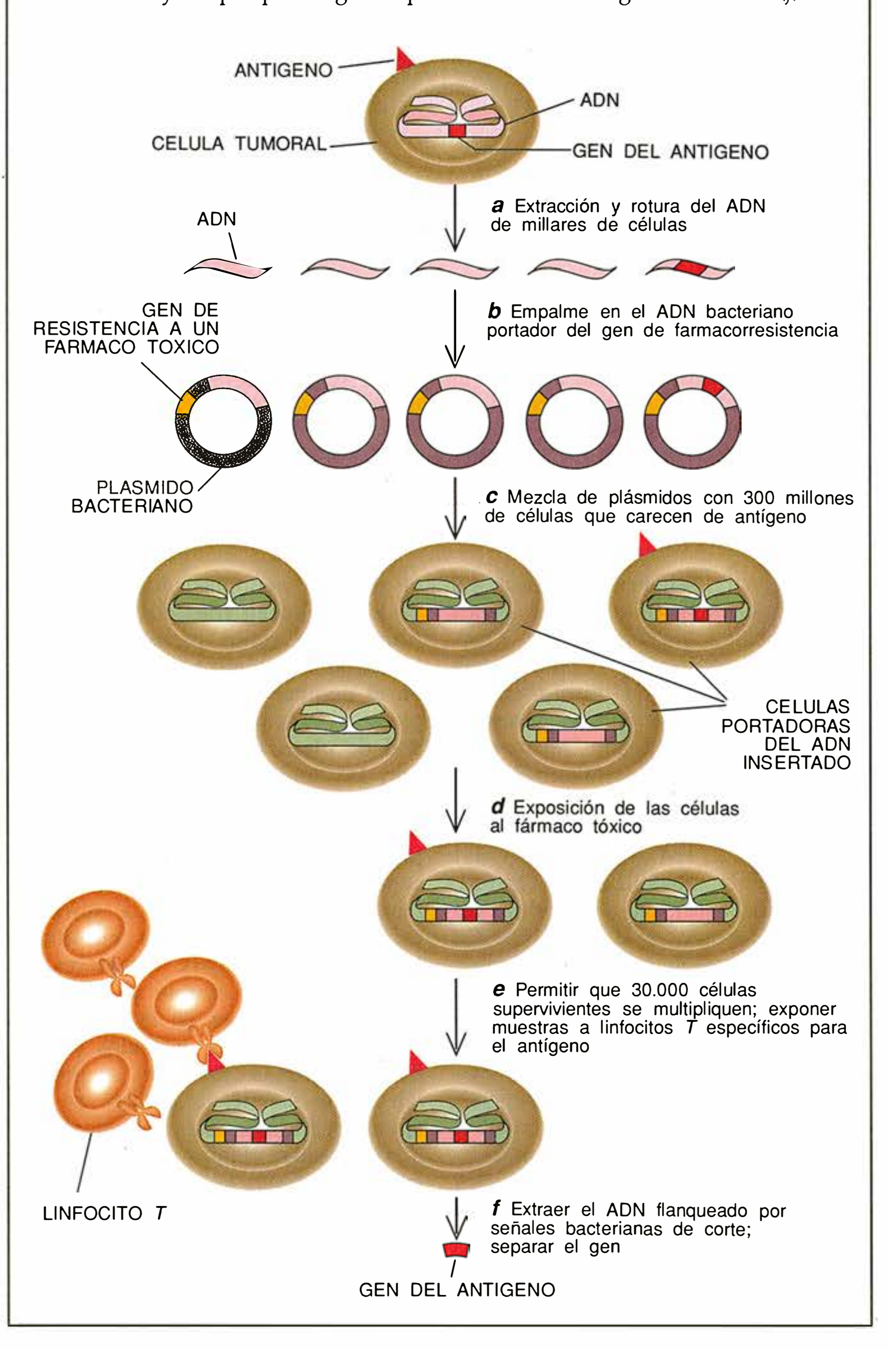
Pudimos evitar tener que comprobar si hasta la última célula estaba capacitada para activar el clon de linfocitos *T* que habíamos seleccionado, gracias a la inclusión en el ADN bacteriano de un gen que confería resistencia a cierto tóxico. Cuando tratamos el conjunto de células con el tóxico, eliminamos las que no habían integrado el plásmido en su ADN. De este modo nos quedaron para analizar 30.000 del total original de 300 millones de células P815. El examen de grupos pequeños de las 30.000 células nos descubrió las pocas que estimulaban la multiplicación de los linfocitos *T*. Después dirigimos la puntería hacia el ADN bacteriano de una de estas células y extrajimos el ADN tum$^-$. Iterando el proceso con este fragmento de ADN, no tardamos en aislar el gen que da origen al antígeno tum$^-$.

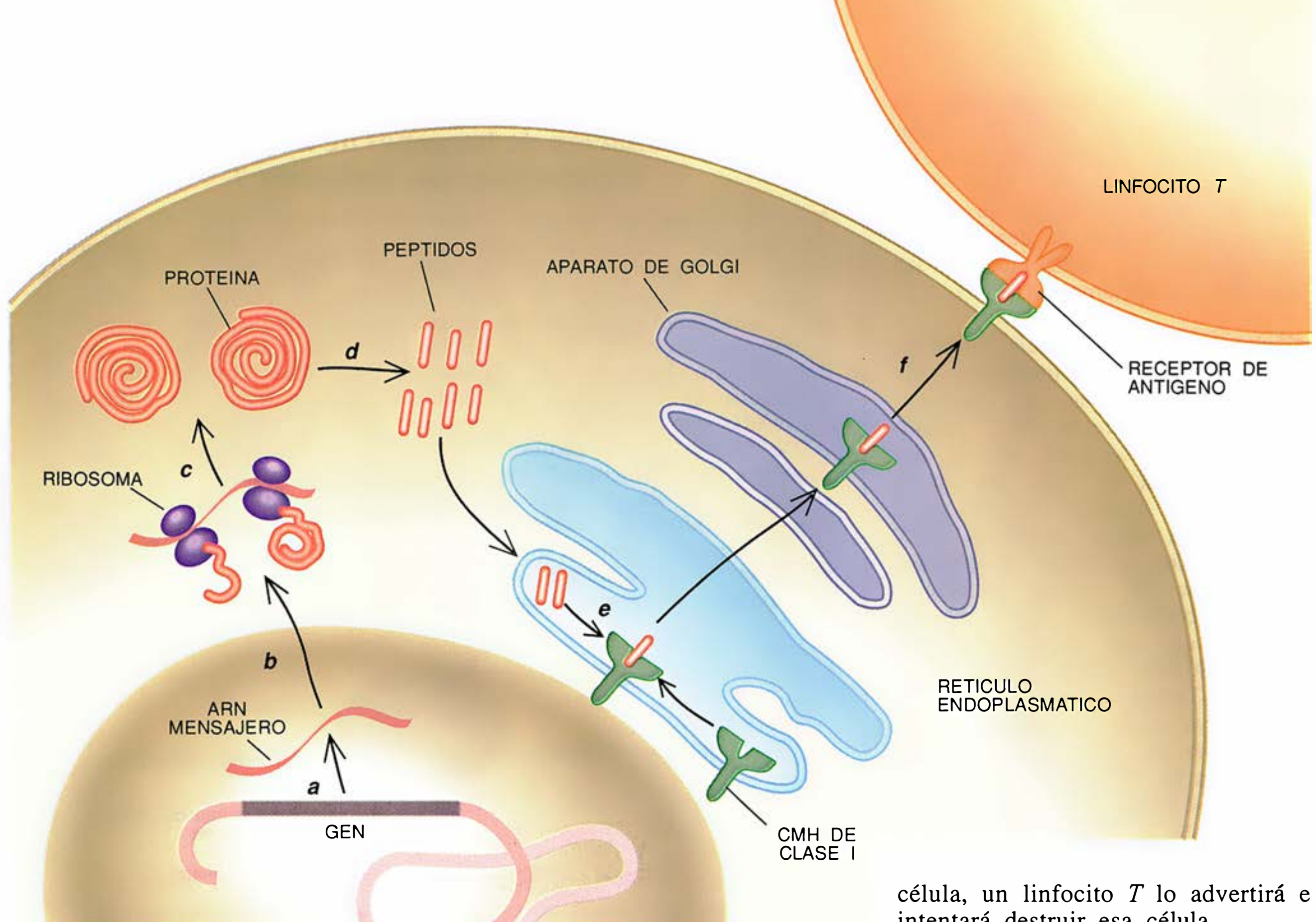
Desciframos la secuencia de nucleótidos del gen, que no se parecía a la de ninguno de los genes conocidos hasta la fecha. Sin embargo, vimos que el gen se expresaba no sólo en la variante tum$^-$ sino también en las células originales P815 y en el tejido normal del ratón. Es decir, el gen que especifica la secuencia de aminoácidos de la proteína se transcribía en moléculas de ARN mensajero, que a su vez se traducían en proteínas.

La expresión en las células normales significaba que nuestro gen especificaba un componente estándar de las células. Pero no todo era normal en la variante tum$^-$. Allí el gen había sufrido una mutación puntual, causando la sustitución de un aminoácido

Clonación de los genes de antígenos reconocibles por linfocitos *T*

La clonación de un gen (*banda roja en el núcleo*) de un antígeno (*triángulo rojo*) en una célula tumoral comienza con la separación y rotura del ADN procedente de múltiples copias de la célula (*a*). Se insertan los fragmentos de ADN resultantes en plásmidos (anillos de ADN bacteriano) portadores de un gen (*amarillo*) que confiere resistencia a un fármaco tóxico (*b*). Se mezclan los plásmidos con células que carecen del antígeno, haciendo que algunas de esas células capten uno o más plásmidos (*c*). Se exponen las células al fármaco tóxico (*b*), eliminando las células que no hayan incorporado el ADN del plásmido en su propio ADN. Se deja que las células supervivientes se multipliquen; se exponen muestras ante linfocitos *T* que reconocen específicamente el antígeno de interés (*e*). Se da por supuesto que cualquier célula que induzca una respuesta linfocitaria (verbigracia, la proliferación) sintetiza el antígeno, lo que significa también que posee el gen correspondiente. De ahí que se separe el ADN foráneo de una célula idéntica, se escinda el ADN bacteriano y se pesque el gen especificador del antígeno deseado (*f*).





2. LAS CELULAS PRODUCEN ANTIGENOS (*complejo rojo y verde arriba a la derecha*) **en un proceso de varias etapas. Una vez que un gen** (*banda roja abajo*) **pone en marcha la síntesis de una proteína** (*a-c*)**, las enzimas degradan estas proteínas** (*espirales rojas grandes*) **en péptidos** (*pequeñas barras rojas, d*)**. Algunos péptidos son transportados al interior de un compartimiento intracelular (el retículo endoplasmático)** (*e*)**, donde pueden combinarse con las moléculas del complejo principal de histocompatibilidad de clase I** (*verde*)**. La asociación péptido-CMH alcanza la superficie de la célula** (*f*)**, para su examen por los linfocitos *T*** (*naranja, arriba a la derecha*)**.**

por otro en la proteína sintetizada. Lo mismo sucedía con otros dos genes tum⁻ clonados posteriormente. Quedamos muy intrigados. ¿Cómo podría una simple sustitución transformar un constituyente de las células normales en un potente antígeno reconocido por los linfocitos *T* citolíticos?

Contemporáneamente, el equipo de Alain R. M. Townsend, del Hospital John Radcliffe de Oxford, acababa de hacer un descubrimiento que nos condujo a la solución. En 1986 demostraron que los linfocitos *T* citolíticos solían detectar proteínas víricas ocultas en el interior de las células. En cambio, los anticuerpos responden sólo ante proteínas que ejercen sus funciones en la superficie celular. Las células *T* pueden realizar esta difícil misión porque, en el curso de la evolución de los mamíferos, ha surgido un sistema complejo de vigilancia de proteínas. Las enzimas celulares trocean en péptidos las proteínas del citoplasma. Estos péptidos se transportan a un compartimiento intracelular especial, el retículo endoplasmático. Algunos de ellos quedan trabados en el interior de un surco presente en unas proteínas especializadas a las que se da el nombre de moléculas del complejo principal de histocompatibilidad de clase I (MHC). (En el hombre, las moléculas MHC se llaman también antígenos leucocitarios humanos, o moléculas HLA.) Los complejos MHC-péptido se trasladan a la superficie, donde se anclan en la membrana y dispuestos a sufrir el escrutinio de las células citolíticas. Los linfocitos cuyos receptores de antígeno pueden unirse a ese complejo desencadenan un ataque contra la célula. Así pues, péptidos derivados de proteínas normales se presentan en la superficie celular de una manera continua. Esta exhibición no produce daño alguno debido a la tolerancia natural: el organismo, en estadios tempranos de la vida, elimina todos los linfocitos *T* que reconocen los propios constituyentes del organismo. Pero si un péptido deriva de una proteína extraña, tal como la de un virus oculto en el interior de una célula, un linfocito *T* lo advertirá e intentará destruir esa célula.

Basándonos en estos descubrimientos, supusimos que las mutaciones puntuales en los tres genes tum⁻ habían convertido péptidos invisibles para los linfocitos *T* en otros visibles. Para corroborar la idea, aprovechamos una observación crucial de Townsend, quien había visto que las células sanas podían hacerse reconocibles instantáneamente por los linfocitos *T* citolíticos antivíricos, si las células se colocaban en un medio que contuviera una versión sintética de un péptido pequeño perteneciente a una proteína vírica. Posiblemente, las células sanas estimulaban los linfocitos porque algunas moléculas MHC de la superficie habían atrapado los péptidos y los presentaban a las células *T*.

Realizamos experimentos de índole semejante para desentrañar la función de las mutaciones tum⁻. Mezclamos células P815 con péptidos pequeños (de 9 a 10 aminoácidos) que codificaban las regiones mutadas de los tres genes tum⁻ que habíamos aislado. Los linfocitos, que reaccionan ante los antígenos tum⁻ pero no atacan a las células P815, lisaban ahora las células. Los linfocitos no lisaban, sin embargo, células P815 que se habían mezclado con péptidos codificados por las secuencias normales de los genes. Demostramos que las mutaciones puntuales en dos de los genes tum⁻ habían dotado, a los péptidos afectados, de capacidad para enlazarse con moléculas del MHC. Las versiones normales de

estos péptidos eran incapaces de unirse a estas moléculas y, por consiguiente, nunca eran presentadas ante el sistema inmunitario. En el caso del tercer gen mutado, la situación era diferente. La versión normal del péptido alterado se unía a las moléculas de MHC. Pero por tratarse de un constituyente del propio organismo, el proceso de la tolerancia natural había eliminado los linfocitos *T* que pudieran responder ante él. La mutación había cambiado la forma de la zona expuesta del péptido, por lo que las células *T* existentes podían ahora detectarlo.

En principio, cualquier mutación que afecte a un gen provoca la aparición de un nuevo antígeno en una célula. Acorde con esa idea, podría producirse una variedad infinita de antígenos por mutaciones aleatorias. Los antígenos que aparecen en los tumores de roedores inducidos por carcinógenos químicos tienen, probablemente, ese origen. Además, las mutaciones pueden transformar ocasionalmente genes normales en otros que den lugar al desarrollo de un cáncer (oncogenes). Algunos de estos cambios oncogénicos podrían generar péptidos antigénicos que algún día se convirtieran en objetivo de la inmunoterapia específica.

Demostrada la eficacia de nuestra técnica de clonado, nos dispusimos a aislar un gen de un posible antígeno de rechazo tumoral —uno que estuviera presente en un cáncer que se desarrollara en un animal. Por fortuna, contábamos con un clon de linfocitos *T* citolíticos que lisaban las células P815 y no lisaban las células murinas normales. El gen que especificaba el antígeno de rechazo tumoral (llamado P815A) reconocido por estos linfocitos era un objetivo lógico en la búsqueda de nuestro gen.

Antes de comenzar, sin embargo, quisimos asegurarnos de que este antígeno —que había sido identificado por linfocitos *T* citolíticos en el tubo de ensayo— podría dirigir también una respuesta inmunitaria frente a un tumor en el organismo. Habíamos ya observado un efecto extraño de las células P815. Cuando se inyectan estas células en los ratones, aparecen los tumores al cabo de un mes; pero algunos ratones desarrollaban tumores sólo después de un prolongado retraso. Cuando al fin aparecían las lesiones malignas, éstas resistían el ataque de los linfocitos *T* citolíticos que respondían ante el P815A. Concluimos que los animales habían rechazado casi todas las células cancerosas P815 porque, en el organismo, linfocitos *T* idénticos a los del clon habían reconocido el antígeno P815A. Pero unas cuantas células tumorales habían dejado de presentar el P815A por haber perdido el gen que las especificaba. Estas variantes de antígeno-perdido habían proliferado, explicándose así la formación tumoral posterior. Se demostraba con ello que un antígeno reconocido por los linfocitos *T* citolíticos en una placa de petri podría constituir también un señuelo útil para provocar una respuesta de rechazo tumoral en el organismo.

Estas variantes de antígeno-perdido podrían servir de receptoras de ADN en nuestro esquema de trabajo para clonar el gen que codifica el antígeno P815A. Aislamos el gen. Construimos una genoteca de ADN a partir de células P815 y transferimos este ADN a células de una variante de antígeno-perdido. Extrajimos el gen a partir de una de las pocas células receptoras que incitaban la proliferación de nuestros linfocitos *T* que respondían al antígeno P815A. Bautizamos el gen con el nombre de *P1A*.

La secuencia nucleotídica del gen *P1A* resultó ser idéntica en las células P815 y en las células murinas normales. Pero en las células normales el gen es inactivo: no determina ningu-

CELULA ORIGINARIA

CELULA ANTIGENICA

MUTACION GENETICA I
El péptido que no se une a una molécula de CMH de clase I y, por tanto, no aparece en la superficie celular (*izquierda*) se convierte (por una mutación en su gen) en un péptido que ya puede presentarse (*derecha*).

MUTACION GENETICA II
Péptido que suele manifestarse, aunque no es no reconocible por un linfocito (*izquierda*), se convierte en otro reconocible (*derecha*).

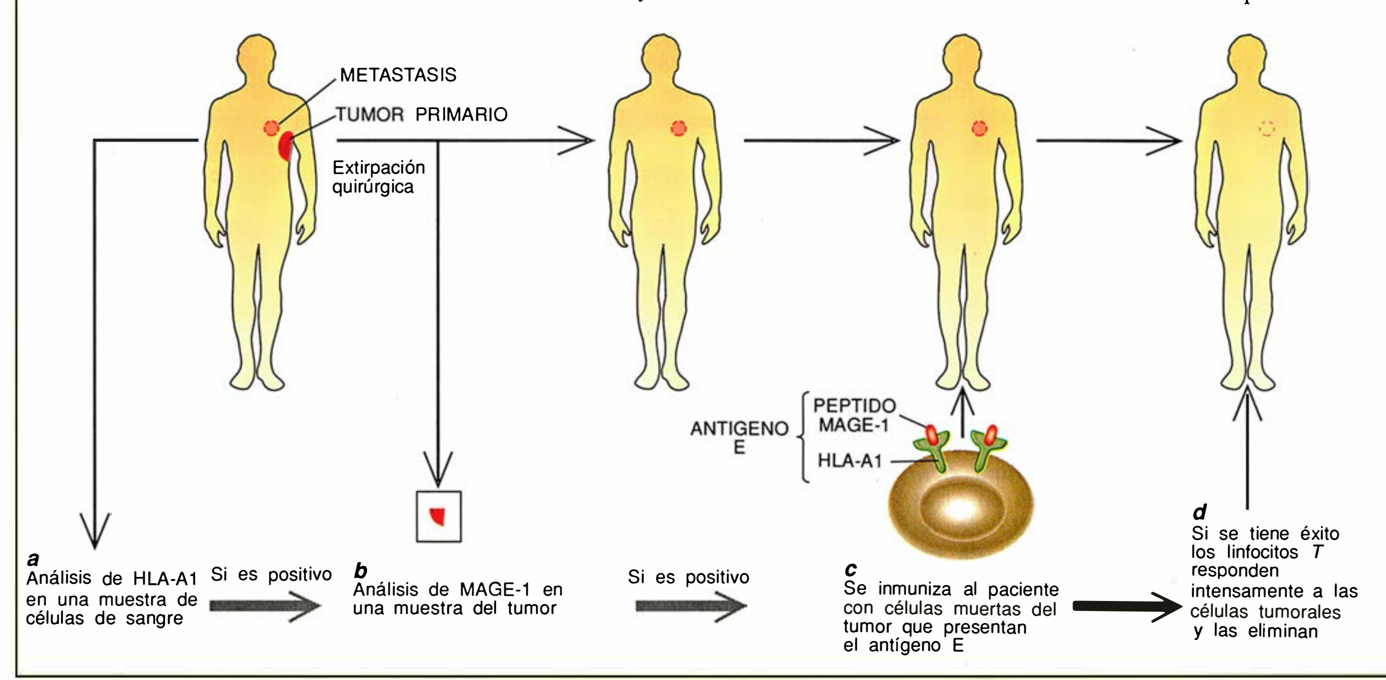
ACTIVACION DEL GEN
El gen que permanece normalmente silencioso, es decir, sin sintetizar péptidos (*izquierda*), se activa y origina un péptido que puede encajar en una molécula de CMH y ser reconocido por un linfocito *T* citolítico (*derecha*).

PEPTIDO
CMH DE CLASE I
GEN
LINFOCITO *T*
MUTACION PUNTUAL
MUTACION PUNTUAL
NINGUN PEPTIDO
GEN SILENCIOSO
GEN ACTIVO

3. UNA MUTACION O UNA ACTIVACION de genes celulares puede hacer que células que no presenten antígenos reconocibles por linfocitos *T* citolíticos (*columna izquierda*) produzcan antígenos (*columna derecha*) reconocibles por células *T*.

Esquema de inmunoterapia específica

Cierto tipo de inmunoterapia probable se basa en el descubrimiento de que los linfocitos *T* citolíticos aislados de algunos pacientes con cáncer sean inducidos a reaccionar ante un complejo molecular denominado antígeno E. Se halla éste formado por una molécula del CMH específica (llamada HLA-A1) y un péptido derivado de la proteína MAGE-1. Los pacientes con melanoma cuyas células produzcan la molécula de HLA-1 (*a*) y cuyos tumores fabriquen también la proteína MAGE-1 (*b*) recibirán una inyección con células muertas que presenten el antígeno E (*c*). Si todo va bien (*b*), los linfocitos *T* específicos del antígeno E proliferarán y destruirán los tumores. El diagrama que aparece a la derecha representa un resumen de los resultados obtenidos con la reacción en cadena de la polime-



na proteína, ni, por tanto, ningún péptido antigénico. Los tumores P815 expresan el gen y generan un antígeno que no está presente en las células normales. Así pues, la expresión de genes ordinariamente silenciosos es otro mecanismo de formación de antígenos. Esperábamos que este último mecanismo generase antígenos comunes a tumores de individuos diferentes. No nos sorprendió que varias líneas celulares del tumor mastocitoma expresaran el gen *P1A*, aunque las células cebadas normales no lo hicieran.

Hacia 1989 estábamos preparados para la caza de genes que codificaran antígenos de rechazo tumoral en células humanas. Centramos nuestra atención en MZ2-MEL, línea celular derivada de un melanoma (un tipo de cáncer de la piel) que había aparecido en una mujer de 35 años, a la que designamos paciente MZ2. Aislamos un gen de esta línea celular de manera parecida a como habíamos obtenido el gen *P1A*.

En un primer paso, aislamos linfocitos *T* citolíticos que reaccionaban ante las células MZ2-MEL a partir de leucocitos de la paciente. Hicimos crecer estos linfocitos cultivando los leucocitos de la paciente con células muertas de su tumor. Aunque el tumor original no indujo rechazo en el organismo, el cultivo de las células durante unas semanas nos permitió aislar linfocitos *T* citolíticos que selectivamente lisaban las células tumorales. A partir de esta población potencialmente mixta de linfocitos antitumorales, generamos poblaciones clónicas, cada una, a su vez, reactiva frente a un único antígeno.

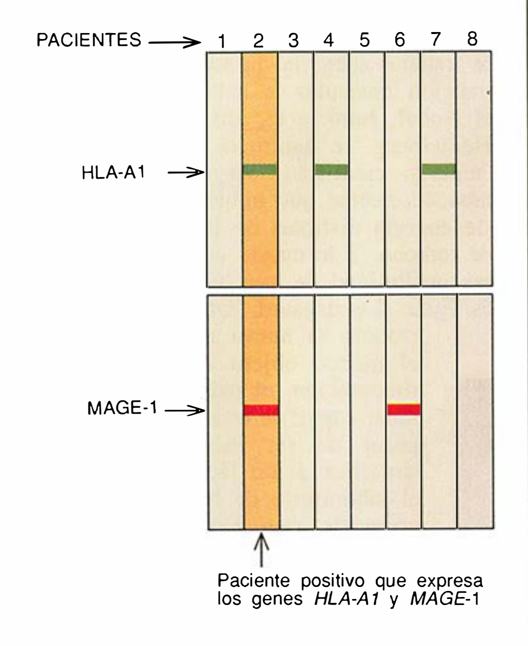
Necesitábamos también una variante de antígeno-perdido que sirviera de receptora de ADN de células MZ2-MEL. En esta ocasión obtuvimos la variante exponiendo varios millones de células MZ2-MEL frente a un número semejante de linfocitos de un clon de células *T* citolíticas —llamado clon anti-E, pues habíamos dado el nombre de "E" a su objetivo antigénico. La mayoría de las células tumorales murió, pero alrededor de una de cada millón sobrevivió. Resultó que las células supervivientes habían perdido el antígeno E. Estas variantes de antígeno-perdido resultaron sensibles frente a otros clones de células *T* dirigidos contra células MZ2-MEL. Por ese hallazgo llegamos, más tarde, al descubrimiento de que el tumor MZ2-MEL presentaba por lo menos cuatro antígenos de rechazo tumoral distintos.

Hasta entonces habíamos aislado sólo el gen que da lugar al antígeno E. Lo conseguimos insertando plásmidos que llevaban el ADN de las células MZ2-MEL al interior de células de una variante que había perdido el antígeno E. De una de las escasas células de antígeno-perdido que activaban el clon de linfocitos anti-E retiramos el gen. Para referirnos a este gen acuñamos el acrónimo *MAGE-1* (a partir de *me*lanoma y *a*ntígeno-1).

Averiguada la secuencia nucleotídica de este gen, nos apresuramos a comprobar si la portaban las células normales de la paciente. La tenían, aunque el gen no se expresaba. De nuevo nos encontrábamos aquí con un antígeno de rechazo tumoral que se había producido por activación de un gen que permanecía silencioso en las células normales. Sugería ello que, a semejanza de lo ocurrido con el *P1A*, ese gen podría encontrarse en estado activo en tumores de otros pacientes. El análisis de una amplia selección de muestras tumorales indica que en más de un 30 % de los melanomas hay una forma activa del gen *MAGE-1*. Más del 15 % de los tumores de mama y de pulmón expresa también este gen.

¿Significan estas cifras que todos los pacientes que expresan el gen *MAGE-1* presentan también el antígeno E en la superficie de sus célu-

rasa, una prueba que puede detectar la expresión de los genes que dan lugar a las proteínas *HLA-A1* y *MAGE-1*. De los ocho pacientes estudiados, tres expresaron el gen *HLA-A1*, y dos eran portadores de tumores que expresaban el gen *MAGE-1*. Sólo un individuo (el paciente 2) dio un resultado positivo en ambas categorías.



las tumorales? No. Recuérdese que lo que realmente reconoce el receptor de la célula *T* no es un péptido solitario, sino un complejo integrado por un péptido y toda la región circundante de la molécula del MHC de clase I. Ahora sabemos que las moléculas del complejo de la clase I están codificadas en el hombre por tres genes (*HLA-A*, *-B* y *-C*), y que estos genes son polimórficos; es decir, pueden diferir de una persona a otra. Cada gen aparece en formas diferentes, entre 10 y 40, llamadas alelos. Por el hecho de que heredamos un conjunto de alelos A, B y C de la madre y otro conjunto del padre, cualquier individuo puede construir seis variedades diferentes de HLA —por ejemplo, HLA-A1, -A10, -B7, -B24, -C4 y -C6—, que a su vez podrían diferir de las seis variedades mostradas por otra persona. Los productos proteicos de los alelos difieren entre sí por la morfología del surco de enlace para el péptido y de la región circundante. Consiguientemente, en una célula dada un péptido se une a una de las moléculas del complejo de clase I disponibles, si es que llega a enlazarse. De ahí que sólo los pacientes que sintetizan la proteína MAGE-1 y una molécula particular de HLA presentarán el antígeno E. También sabemos ya que el componente MHC del antígeno E es HLA-A1, y que el péptido del MAGE-1 que se une a esta molécula de HLA contiene nueve aminoácidos.

¿Podrían los pacientes que carecen de HLA-A1, si bien producen la proteína MAGE-1, presentar antígenos que reconozcan los linfocitos *T*? Lo ignoramos. En teoría, esos antígenos podrían crearse, si los péptidos pertenecientes a la proteína MAGE-1 se enlazaran en moléculas de HLA distintas de las HLA-A1. Pero no tendremos seguridad de la existencia de esos antígenos hasta descubrir qué linfocitos *T* reaccionan ante ellos. No hemos conseguido todavía esos linfocitos. Las células *T* que reconocen el antígeno E no responderían ante tales antígenos porque se unen sólo a la forma específica adoptada por el péptido en el antígeno E y la parte de molécula de HLA-A1 que la rodea.

La identificación del gen que codifica un antígeno de rechazo tumoral humano abre una nueva fase en la búsqueda de una inmunoterapia específica eficaz contra el cáncer. Por primera vez se nos presenta la posibilidad de seleccionar pacientes que podrían beneficiarse de ella. Podemos ser selectivos, porque es posible identificar con facilidad a aquellos pacientes cuyos tumores porten el conocido antígeno. Más aún, poseer el gen de un antígeno de rechazo tumoral significa que podemos diseñar vías nuevas para inmunizar a dichos pacientes. Por último, tenemos también la oportunidad de determinar con rapidez si el sistema inmunitario está respondiendo a nuestra intervención, porque podemos medir los cambios en el número de los linfocitos *T* citolíticos sin tener que esperar a que se hagan patentes los efectos clínicos, como puede ser la ausencia de una recidiva.

Hemos comenzado una línea de trabajo sobre inmunización de pacientes con melanoma contra el antígeno E. Concentramos nuestros esfuerzos en la evaluación de la respuesta de la célula *T* citolítica ante el antígeno. Nuestros métodos de identificación de candidatos para esta terapia son mucho más sencillos que lo que cabía imaginar. Sólo necesitamos saber si sus tumores expresan los genes del *HLA-A1* y *MAGE-1*. En los pacientes que van a ser sometidos a una intervención quirúrgica para extirparles un tumor, se puede determinar el tipo de HLA que poseen siguiendo dos caminos. Uno requiere una pequeña muestra de sangre y permite disponer del resultado en unas pocas horas. En los individuos en los que resulte positiva la prueba de HLA-A1, puede congelarse una muestra del tumor inmediatamente después de la intervención. Dentro de los 2 días siguientes, la técnica de la reacción en cadena de la polimerasa nos dirá si los tumores expresan también el gen *MAGE-*. Alrededor del 26 % de los individuos de raza blanca y el 17 % de los individuos de raza negra portan el alelo *HLA-A1*. Teniendo en cuenta que un 30 % de los pacientes con melanoma expresan el gen *MAGE-1*, podemos predecir que alrededor del 8 % de ellos presentarán el antígeno E en sus células tumorales.

Algunos modos de inmunización pueden ensayarse en candidatos que encajen dentro de nuestro doble criterio. Al haberse identificado el gen *MAGE-1* y el péptido antigénico podemos inducir la expresión del antígeno en varios tipos de células. Versiones muertas de las células pueden inyectarse en los pacientes para hacer que sus linfocitos anti-E entren en acción. Nuestros primeros estudios clínicos seguirán ese protocolo.

También esperamos evaluar la eficacia de insertar un gen de una interleucina, como el de la interleucina-2, en la células que expresan el antígeno E. La interleucina debería facilitar la activación de los linfocitos *T* alrededor de estas células. También comprobaremos el efecto de péptidos E sintéticos o proteínas MAGE-1 purificadas, mezclados con una substancia estimuladora de la inmunidad llamada coadyuvante. Por último, podríamos insertar el gen *MAGE-1* en el ADN de un virus inocuo que penetre en las células humanas, sin que logre reproducirse en su interior. Después de que se hayan inyectado estos virus recombinantes a los pacientes, deberían quedar infectadas algunas células, que habría de sintetizar la proteína MAGE-1 y presentar el antígeno E durante algún tiempo. La inmunización con péptidos, proteínas y virus recombinantes ya ha demostrado ser bastante eficaz en otras aplicaciones.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A GENE ENCODING AN ANTIGEN RECOGNIZED BY CYTOLYTIC T LYMPHOCYTES ON A HUMAN MELANOMA. P. van der Bruggen, C. Traversari, P. Chomez, C. Lurquin, E. De Plaen, B. Van den Eynde, A. Kunth y T. Boon en *Science*, vol. 254, págs. 1643-1647; 13 de diciembre de 1991.

TOWARD A GENETIC ANALYSIS OF TUMOR-REJECTION ANTIGENS. Thierry Boon en *Advances in Cancer Research*, vol. 58, págs. 179-210; 1992.

Luis Alonso

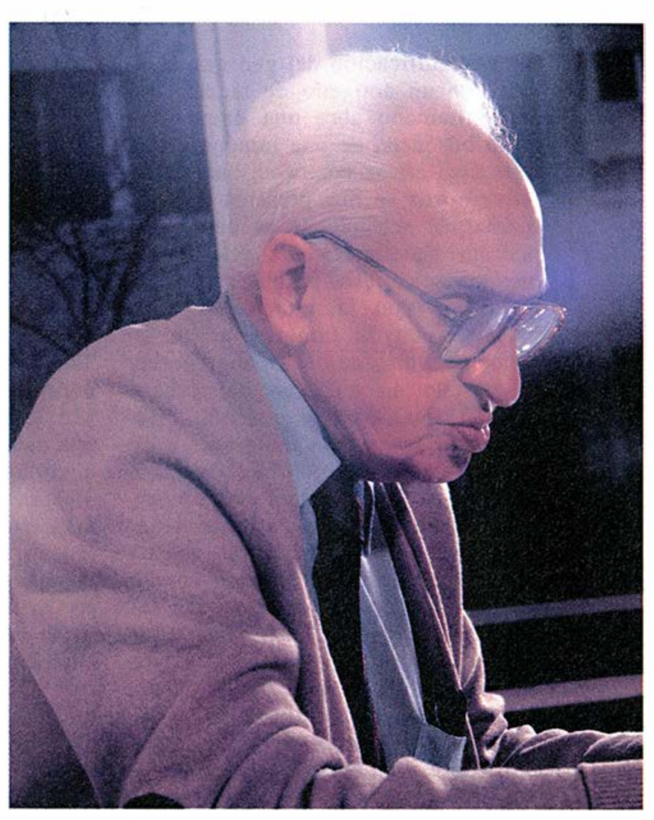
SEVERO OCHOA: *el compás de la bioquímica*

Longilíneo, frente ilimitada y severidad en el gesto. Fuera le llamaban el Greco. Aquí recuerda más los patriarcas cálidos de su paisano Alejandro Casona. Comparaciones aparte, ha vivido siempre entre dos amores: la música y la bioquímica. Ha perdido alegría y su mirada se desvanece ausente. Dicen que desde la muerte de Carmen, su mujer. Pero aún sale alguna que otra vez en los periódicos, calada la boina y medio perdido en el entorno. Se ha apagado, quizás en buena hora, el eco de los ditirambos y la retórica de los homenajes. Pero quienes debieran facilitar su magisterio entre nosotros han secuestrado, con el silencio y la omisión, su presencia y no le perdonan su última denuncia, la politización sectaria y empobrecedora de los organismos rectores de la investigación científica en España. "No creo que el poder político preste mucha atención a lo que digamos los científicos. Ellos tienen los suyos que son miembros del Partido y lo que prevalece son los criterios de esas personas... Para mí, si un científico pertenece a un partido político, ya dudo mucho de su categoría científica."

Mientras escuchamos esas declaraciones no podemos menos de evocar el ejemplo en Italia de Rita Levi-Montalcini, convertida en mentora de las nuevas promociones de histólogos, o recordar la última página de la autobiografía de Cajal: "Tengo además el indeclinable deber de guiar a mis discípulos, infundiéndoles inquebrantable confianza en sus propias fuerzas y fe robusta en el progreso indefinido."

Ochoa nació en Luarca en 1905. A los diecisiete años entra en la facultad de medicina de la Universidad Central. En el tercer curso, Juan Negrín le invita a trabajar como instructor de clases prácticas de su laboratorio de fisiología. Era la época en que el médico canario, formado en Leipzig con Theodor von Brücke, ahondaba en las relaciones entre el sistema endocrino y el nervioso, al par que ideaba nuevos instrumentos para llevar a cabo los experimentos hábilmente diseñados. En él y en Teófilo Hernando, farmacólogo, reconoce Ochoa sus maestros españoles.

Las primeras investigaciones sistemáticas, metabolismo muscular de la creatina y su producto final, la creatinina, las realiza en el laboratorio de la Residencia de Estudiantes. Saca horas libres para estudiar inglés y alemán. En el verano del 27, año que da nombre a una generación poética, la de García Lorca, con quien comparte aficiones musicales, aprovecha las vacaciones para trasladarse a Glasgow, donde trabaja con Noel Paton sobre el metabolismo de las guaninas y prepara las notas para su primera publicación, en *Proceedings of the Royal Society:* "La acción de la guanidina sobre los melanóforos de la piel de la rana".



Severo Ochoa

La ciencia del primer tercio de nuestro siglo habla, sobre todo, alemán. En Berlín está Otto Meyerhof, cuyos trabajos sobre la química de la contracción muscular le habían valido el Nobel. Junto a él, allí y luego en Heidelberg, se habituará al rigor del método científico. Meyerhof no acababa de creerse que hubiera fuentes de energía distintas de los hidratos de carbono. Y le manda adentrarse en esa posibilidad de que hablaba el danés Ejnar Lundsgaard. Ochoa corroboró la nueva tesis con el mismo objeto de experimentación, el músculo de rana, capaz de contraerse a pesar de ser incapaz de sintetizar ácido láctico. En el laboratorio de Meyerhof coincide con Fritz Lipmann, descubridor de la coenzima A, molécula que desempeña una función destacada en la oxidación y en la síntesis de los ácidos grasos. La relación del español con Lipmann fue especialmente fructífera y dilatada; iniciada ese año de 1929, cuando ambos trabajaban codo a codo sin cobrar un marco. "Recuerdo los paseos que nos dábamos con su coche deportivo en Heidelberg. Nos separamos... para volver a encontrarnos en Nueva York... De entonces guardo con particular agrado sus excitantes seminarios dominicales, con una audiencia repleta de estudiantes, colegas e invitados... Eran los años en que la bioquímica alcanzó su máximo esplendor."

La glicolisis y vías metabólicas asociadas, uno de los quicios de la bioquímica moderna —el otro será el código genético—, le siguen absorbiendo en esos años anteriores a la defensa de su tesis doctoral, en 1934. Quería Negrín que todos los componentes de su equipo ganaran las cátedras de fisiología que se convocaran en la universidad. A instancia suya, optó a la plaza de fisiología de Santiago. No la ganó, pese a presentar los mejores ejercicios. La

política de partido, a la que se había consagrado ya el que sería jefe de gobierno y entonces presidente del tribunal, mostró ahí su rostro torvo. Ochoa tiene treinta años y sigue investigando sobre los compuestos fosforados del músculo y la glicolisis, ahora en el Instituto de Investigaciones Médicas que acaba de fundar Carlos Jiménez Díaz.

Sortea como puede el primer año de guerra civil y escapa con su mujer de Madrid a París, decidido a volver con Meyerhof. En París coincide con Xavier Zubiri. Pasan horas, les sobran, discutiendo sobre las fronteras de la ciencia y las relaciones entre ésta y la filosofía.

En Heidelberg se inicia en el campo de las coenzimas, cuyo dominio afianzará, al cabo de varios meses en el laboratorio de Biología Marina de Plymouth, donde llega con la recomendación de A. V. Hill. La fiebre antisemita abrevia, en efecto, su estancia en Alemania. Meyerhof es judío, como el dueño de la casa donde se hospeda Ochoa. De 1938 a 1940 permanece en el Laboratorio de Bioquímica de la Universidad de Oxford. Rudolph A. Peters, de él se dice deudo, le suma a su investigación sobre el efecto de la vitamina B_1 (tiamina) en el metabolismo del piruvato.

Cada experimento, cada técnica aprendida, cada proceso ensayado en la identificación de pasos y metabolitos intermediarios en las diferentes vías mencionadas rematan en su correspondiente artículo. No demasiados. Son años en que no se conoce el virus de la publicación desaforada que se ha cebado en la comunidad científica. Los suyos le servirán de tarjeta de acreditación cuando no pueda mostrar los títulos académicos abandonados en la salida precipitada del Madrid en guerra.

En los trabajos de Oxford se advierte ya su obsesión puntillista. Diríase que no tiene prisa. Los descubrimientos pueden ser, muchas veces, fruto del azar, y la fortuna le bendijo en alguna ocasión crucial. Pero el gozo de la investigación bien hecha es más duradero. Así sucedió a principios de los cuarenta cuando demostró, todavía en el ámbito del metabolismo de los hidratos de carbono y en particular de la glicolisis, el acoplamiento establecido entre la oxidación del ácido pirúvico y la fosforilación en el cerebro del pichón; se apoyaba en tres fenómenos observacionales: en ausencia de piruvato y fumarato no hay consumo de oxígeno ni fosforilación, la intensificación de la fosforilación se produce con la adición de la enzima cocarboxilasa al par que decrece el piruvato y aumenta el consumo de oxígeno, y, por último, el bloqueo de la fosforilación con arseniato inhibe la oxidación del piruvato.

La entrada de Inglaterra en guerra contra Alemania, con el enrolamiento consiguiente del personal en la logística bélica, le fuerzan a un nuevo exilio. Pero, del tronco de los indianos, no le asusta lo desconocido, que además no lo es, puesto que ya estuvo en América durante un congreso de bioquímica años atrás. Les acogen en San Luis los Cori, Carl y Gerty, quienes acababan de aislar la fosforilasa y habían logrado sintetizar *in vitro*, gracias a esa enzima, el glucógeno. En el año y medio que pasa con ellos se ejercita en una nueva técnica, el aislamiento y caracterización de enzimas, que tanto le habría de servir para sus inmediatos trabajos de identificación de distintos pasos intermedios del ciclo de Krebs. Cumplidos ya los 37 años, tal vez debiera pensar en volar por sí mismo, le insinúa su mujer.

"Cumplidos ya los 37 años, tal vez debiera pensar en volar por sí mismo, le insinúa su mujer."

Se lo facilita la plaza que le ofrece la Universidad de Nueva York. Da por cerrada su etapa de formación. Tiene ahora su propio laboratorio, lo que significa acometer su plan de investigación con entera libertad. Y uno de los primeros proyectos que se señala es el de detallar la enzimología del ciclo de los ácidos tricarboxílicos, en particular la proteína que cataliza la fijación del CO_2 al ácido pirúvico con formación de malato. Vendrá luego su intervención en el mecanismo de la fotosíntesis, en que aprovechando la misma enzima demuestra que los cloroplastos de las hojas de espinaca sintetizan ácido málico a partir de piruvato y de dióxido de carbono. Con esos trabajos se cierran también sus incursiones en las vías metabólicas.

La investigación continuada en los mecanismos de la fosforilación oxidativa le indujo a pensar que "sería de interés estudiar el proceso en extractos de *Azotobacter vinelandii*, una bacteria en la que los procesos oxidativos son muy intensos. El plan de los experimentos era muy simple. Se incubaban extractos bacterianos con adenosín-trifosfato y fosfato inorgánico marcado con fósoforo radiactivo y se seguía la incorporación de la radiactividad del P^{32} en el ATP. Los experimentos fueron inmediatamente positivos." Y tan positivos. El producto de la reacción era un "ácido-insoluble, un polinucleótido". La reacción estaba catalizada por la polinucleótido fosforilasa, enzima que formaba el cebador mediante la adición de bases nucleotídicas en una cadena de ARN. Dicho en plata: descifraba *in vitro* la clave genética. El reconocimiento vino, de Estocolmo, en forma de telegrama, fechado el 15 de octubre de 1959: "El Instituto Carolino le ha concedido el Nobel de este año en fisiología, compartido con el profesor Arthur Kornberg (su discípulo) por sus descubrimientos del mecanismo de la síntesis biológica de los ácidos ribonucleico y desoxirribonucleico."

Le gusta recordar, y alabar, la vida neoyorquina. América ha vuelto a reunir, con suerte dispar, a maestros y alumnos de la Alemania prenazi. Se ve frecuentemente con Meyerhof, más humano en la dificultad. Y sigue trabajando. La segunda parte del dogma central de la bioquímica de la herencia tiene por artículo único la biosíntesis de proteínas. Atacó el problema en corto y por derecho: partió de bacteriófagos de ARN, que ahorraba el paso de la transcripción de ADN en ARN, y halló la enzima catalizadora de la multiplicación del ácido ribonucleico en las células, la ARN-sintetasa. Y en su afán purista llegó, con su escuela, hasta el descabello, vale decir, la identificación de factores de iniciación (proteínas) de la cadena polipeptídica y la demostración de que UAA era un triplete nucleotídico o codón de iniciación.

Ama la pintura. Goya le apasiona. Si bien, aunque no lo confiese explícitamente, parece volver a sus charlas con Zubiri sobre los fundamentos y las cuestiones centrales del origen de la vida, del cerebro, del hombre. ¿Sabía Krebs de su preparación humana cuando ponderaba su forma global de abordar los problemas que lo son? La idea, en sus manos, se descuartiza en las fases precisadas por el rigor experimental. "Me enseñó cuánto importa la purificación y cuidadosa caracterización de los productos formados con las enzimas purificadas para poner de manifiesto las vías y mecanismos más complejos", señala por todos B. L. Horecker. Como en la obra de Casona, el viejo árbol sigue en pie. Porque es historia.

Ciencia y sociedad

Aunque esencial, no imprescindible

Gen regulador

Los genéticos están asistiendo a un asombroso combate de boxeo. Se valen de sondas moleculares para eliminar un gen de un ratón y seguir la forma en que dicha pérdida afecta al organismo. En 1992, Lawrence A. Donehower y Allan Bradley, de la Facultad Baylor de medicina, la han emprendido contra el *p53*, gen que parecía ser un peso pesado en el desarrollo embrionario. Para sorpresa de casi todos, con el gen fuera de combate el ratón aún se mantiene en pie. Lo que ha obligado a replantearse el papel de *p53*.

Este descubrimiento y otros experimentos recientes, algunos relacionados con el gen *Rb*, están arrojando nueva luz sobre la regulación del crecimiento celular, y hay quien empieza a cuestionar la hipótesis de la irreemplazabilidad de los genes durante el desarrollo y su intervención en el cáncer.

La excitación que ha provocado tal observación radica en el hecho de que *p53* y *Rb* son genes supresores de tumores. Las personas y animales que no tienen esos genes, o que los tienen dañados, tienden a desarrollar tumores. Los individuos que heredan sólo uno de los dos genes *p53* normales manifiestan el síndrome de Li-Fraumeni, una predisposición al cáncer de mama y de otros muchos tejidos. Las personas con sólo una copia de *Rb* suelen desarrollar retinoblastomas, tumor retiniano que da nombre al gen, *Rb*.

Esos fenómenos y otros de parejo tenor determinaron que bastantes biólogos celulares consideraran genes "maestros" el *p53* y el *Rb*, encargados de guiar el desarrollo y crecimiento de las células durante la formación armónica de un embrión. Sin ellos, razonaban, un embrión se convertiría en una masa desorganizada, y nunca vería la luz. Ahora bien, cuando Donehower y Bradley consiguieron dejar fuera de combate al gen *p53* de ratón, los animales sobrevivieron y presentaban al nacer un aspecto de lo más sano. Cierto es que más del 70 por ciento desarrollaron tumores en los seis primeros meses. Por lo que parece, pues, el gen *p53*, aunque no resulta indispendable durante el desarrollo temprano, sí lo es para impedir la manifestación de tumores en una edad más avanzada.

A Michael B. Kastan el caso no le tomó por sopresa. Kastan, de la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins, presentó, en agosto del año pasado, pruebas de que *p53* actúa como "controlador" o revisor de la integridad del ADN. Descubrió que, tras recibir una dosis de rayos gamma, las células normales detienen su desarrollo, para dar tiempo a la intervención de los mecanismos encargados de reparar los daños producidos por las radiaciones. Según Kastan, la proteína p53 actuaría de "señal que detiene la síntesis de ADN hasta que el daño es reparado". Y añade: "Si *p53* no funciona, falta la señal y las células siguen replicando su ADN dañado." Al acumularse los daños, algunas células sufren cambios que las transforman en cancerosas.

Experimentos realizados en los laboratorios de Geoffrey M. Wahl, del Instituto Salk de Estudios Biológicos en San Diego, y Thea D. Tlsty, de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, han verificado que *p53* impide al menos un tipo de anormalidad genética común en los tumores. Wahl, sin embargo, no apoya la interpretación de Kastan sobre el papel de *p53*. Más que a los daños genéticos, *p53* respondería a la carencia de ciertos metabolitos esenciales para la replicación y la función de los genes.

Bert Vogelstein, de la Johns Hopkins, un pionero en el estudio de *p53*, sostiene que ni los experimentos con ratones ni los demás trabajos resuelven el problema fundamental del papel de *p53* en embriones y tumores. Por ejemplo, el ratón que carece de *p53* puede haberse desarrollado correctamente porque otros genes realizaron el trabajo de *p53*. "Muchos genes considerados cruciales para el desarrollo normal pueden ser elimi-



Ratones privados del gen p53 cuyo desarrollo normal muestran orgullosos sus creadores, Lawrence A. Donehower y Allan Bradley.

nados, y el ratón no se ve afectado", insiste Vogelstein. "Los mamíferos tienen una increíble capacidad para tolerar pérdidas de genes específicos."

Bradley duda que *p53* sea genéticamente redundante. Quizá sólo tenga una función altamente específica; su ausencia podría limitarse a causar deficiencias muy específicas. En muchas células, prosigue razonando, que posean incluso la proteína p53, ésta podría carecer de función. "Si tenemos ADN basura, ¿por qué no podemos tener ARN y proteínas basura?, se pregunta.

Sea como fuere, la eliminación de *p53* no destruye a los embriones de ratón. No ocurre lo mismo con *Rb*. Bradley, Robert A. Weinberg, del Instituto Whitehead, adscrito al Tecnológico de Massachusetts, y Hein te Riele, de la Universidad de Amsterdam, han comprobado que los ratones que carecen de *Rb* mueren antes del decimosexto día de desarrollo embrionario. Falla en ellos la diferenciación del sistema nervioso y de los glóbulos rojos. Los ratones con un solo gen *Rb* se van formando con normalidad, pero suelen morir, a edad temprana, de tumor cerebral.

Este tipo de resultados también plantea interrogantes sobre el papel de *Rb*. Su falta no crea problemas al embrión hasta los 13 días de desarrollo. ¿Quién regulaba el ciclo celular hasta entonces? *Rb* se expresa en todas las células del cuerpo. ¿Por qué sólo unos pocos tejidos se desarrollan anormalmente en ausencia del gen?

Estas son sólo algunas de las preguntas que guían las investigaciones sobre *Rb* y *p53*. Es preciso profundizar más para determinar con precisión cuándo, por qué y cómo se activan los dos genes. Para Vogelstein, gran parte de las investigaciones se dirigirán hacia los genes y proteínas que son controlados por *Rb* y *p53*.

Los trabajos sobre *p53* podrían tener una relación directa con el tratamiento o prevención del cáncer. Kastan sugiere que, en terapias futuras, los pacientes podrían recibir dosis baja de radiación, para suspender transitoriamente el crecimiento de los tejidos normales. Como las células cancerosas, carentes de *p53*, crecerían sin hacer caso alguno, un tratamiento con agentes químicos adecuados las mataría selectivamente. Donehower sugiere también que los ratones sin *p53*, por su especial sensibilidad, podrían ser útiles para probar la carcinogenicidad de algunas sustancias. Da la impresión de que, a pesar del golpe encajado, estos ratones podrían ser todavía campeones.

Cosmología

¿Hay materia oscura en las galaxias espirales?

La velocidad de rotación del gas que se encuentra en la periferia de las galaxias espirales es, al menos hasta donde se ha podido observar, independiente de la distancia a que se halle del centro galáctico (es decir, su curva de rotación es plana). J. L. Garrido, M. M. Membrado, E. Florido y quien esto firma, de las universidades de Granada y Zaragoza, publicamos recientemente un artículo en *Nature* en el que sosteníamos que este hecho sorprendente puede tener una causa magnetohidrodinámica; su explicación, pues, no requeriría hipótesis más atrevidas, como la de la existencia de una materia oscura de naturaleza desconocida.

Nuestro grupo de investigación viene dedicándose, desde hace unos años, al estudio del campo magnético de las galaxias espirales en sus regiones periféricas. Habíamos comprobado que el campo puede alabear, ensanchar, estirar y arrugar en acordeón ("corrugar") los discos galácticos. ¿No podría aumentar también su velocidad de rotación? Si fuese así, una de las pruebas más sólidas de la existencia de materia oculta precisaría de una seria revisión. Valía, pues, la pena averiguarlo, sirviéndonos, además, de las mismas técnicas empleadas en la investigación de tales distorsiones.

¿En qué pruebas se funda la hipótesis vigente sobre la materia obscura? La principal prueba observacional es la curva de rotación plana de las galaxias espirales. Si la autogravitación sólo estuviese compensada por la fuerza centrífuga, la curva de rotación debería ser kepleriana para grandes radios galactocéntricos y disminuir en razón inversa al cuadrado del radio (según $r^{-1/2}$), de la misma forma que disminuye la velocidad de traslación de los planetas al aumentar el radio de su órbita. Aceptada esta premisa y dado aquel hecho, cabe inferir que la masa de las galaxias decuplica quizá la masa visible existente en las estrellas y el gas intergaláctico. Así, la masa de nuestra galaxia sería, de admitirse la hipótesis de la materia oculta, de 10^{12} masas solares, en vez de las 10^{11} masas solares que se suponía hace poco más de una década.

Conviene no olvidar lo siguiente: para un radio muy grande, la velocidad de rotación se determina a través del efecto Doppler, que se mide en alguna raya de emisión del gas interestelar, casi siempre en la de 21 centímetros del hidrógeno atómico. Sin embargo, a esas enormes distancias galactocéntricas, de unos 10^5 años-luz, la población estelar es inobservable; vale decir, es imposible medir el desplazamiento Doppler de ninguna raya de absorción de origen estelar. Nadie ha comprobado, por tanto, que la curva de rotación estelar no sea de tipo kepleriano, ni, por tanto, que el gas y las estrellas de la periferia giren con la misma velocidad angular.

Otras pruebas que respaldan la hipótesis de la materia oscura se basan en la aplicación del teorema del virial (tocante al movimiento promedio de un sistema de muchos cuerpos) a galaxias elípticas y cúmulos de galaxias, si bien adolecen de serios problemas observacionales.

Técnicas recientes permiten calcular la densidad media del universo de otra manera (basándose en la determinación del campo de velocidades en una fluctuación de densidad con respecto al flujo de Hubble). Cuando se aplican, se obtiene una densidad que centuplica la densidad de la materia visible y se aproxima al valor de la densidad crítica (por encima de la cual el universo sería cerrado, y justo con ella, plano).

Además de las mencionadas pruebas observacionales, la hipótesis de la materia oscura cuenta con razones teóricas de peso. La nucleosíntesis primordial del helio y otros elementos ligeros, que tuvo lugar algo más de un segundo después de la gran explosión, debió realizarse en un medio con una densidad tal, que hoy ésta debería ser aún unas 10 veces superior a la visible. Hay que tener en cuenta que esta densidad, obtenida a través de la contrastación entre modelos teóricos y observaciones, es de tipo bariónico (tipo de partículas al que pertenecen protones y neutrones).

Por otra parte, el modelo inflacionario del universo predice que la densidad de éste ha de ser igual a la crítica, y los físicos de altas energías mantienen que hay partículas inobservables. Ciertas teorías sostienen, además, que el disco galáctico sería inestable de no hallarse inmerso en un halo oscuro esférico de gran masa, si bien estas teorías parecen requerir más masa oculta que la deducida a partir de la curva de rotación.

Pero también los campos magnéticos pueden explicar la curva de rotación plana en la periferia de las galaxias espirales.

El campo magnético de una galaxia se comporta en el medio interestelar de forma muy distinta de como lo hace en el laboratorio. El hecho de que pueda permanecer sin disipar-

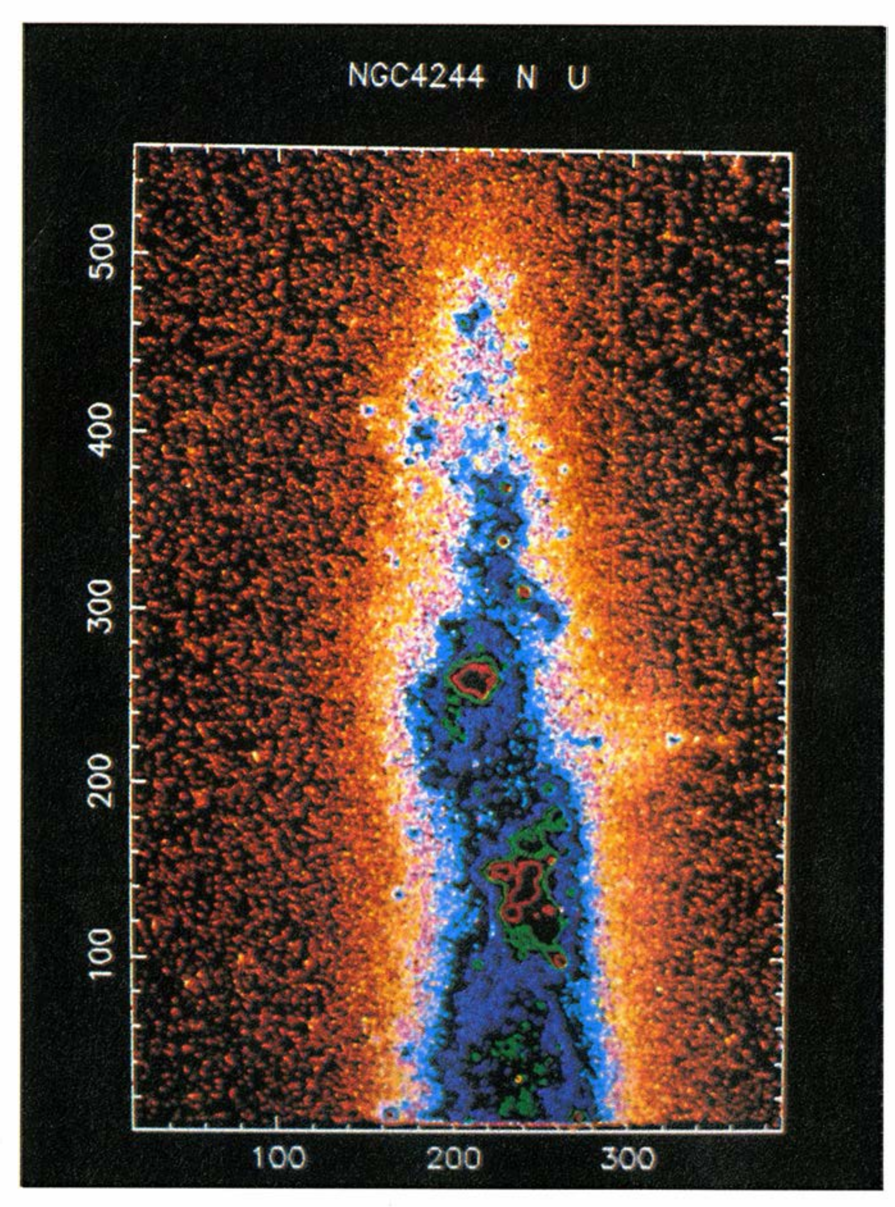


Imagen digitalizada fotométrica obtenida con filtro U (banda de frecuencia en azules), de la parte nordeste de la galaxia NGC 4244. La unidad es un píxel (0,54 segundos de arco con el detector empleado). Obsérvese la llamativa ondulación del disco, especialmente a unos 250 píxeles del centro.

se un tiempo muy superior al de la vida del universo es, quizá, su propiedad más sorprendente. En un medio de la turbulencia del medio interestelar, su comportamiento reviste complejidad mayor. Los movimientos convectivos multiplican la intensidad del campo, pero cuando éste es muy intenso, se disipa por difusión turbulenta. Sin embargo, el caos turbulento conduce al establecimiento de un campo medio con estructuras geométricas sencillas. A este efecto, descubierto en el magnetismo de la atmósfera solar, se le llama efecto dinamo.

El "modo" geométricamente más simple que pueda generar el efecto dinamo en una galaxia es el materializado en nuestra vecina M31, la galaxia de Andrómeda, donde las líneas de campo magnético son círculos en torno al eje de rotación de la galaxia. (El campo es azimutal). La elegimos para probar nuestra hipótesis. Además, su cercanía permite disponer de mediciones más numerosas y precisas, que facilitan la comprobación de los resultados. En otras galaxias la distribución del campo magnético es menos simple, pero también en ellas la componente azimutal del campo es importante o incluso dominante. De ahí que nos limitásemos a estudiar el efecto de la componente azimutal del campo magnético en la rotación galáctica.

El magnetismo produce dos tipos de fuerza sobre el medio interestelar: *a*) la originada por un gradiente de densidad de energía magnética, que actúa de presión y tiende a uniformar el propio campo y el medio magnetizado que lo sustenta, y *b*) la que podría denominarse "inercial magnética", que con frecuencia tiende a extender filamentosamente el plasma a lo largo de las líneas de campo.

En el caso de un campo magnético azimutal en un disco galáctico, la primera fuerza, aunque influye, opera hacia fuera. Esto se debe a que, en la periferia del disco, el campo magnético disminuye con el radio galactocéntrico, ya que debe conectar con el campo magnético intergaláctico, mucho más débil.

Nos centramos en la fuerza inercial magnética. Apunta ésta hacia dentro, reforzando la acción de la gravedad. El equilibrio requerirá, pues, que la fuerza centrífuga sea mayor que la necesaria para que haya un equilibrio puramente gravitatorio. En la práctica, los cálculos son más complicados, pues hay que tener presentes los potenciales creados por el sistema estelar y el gas, cuya obtención no es trivial, además del gradiente de presión magnética. Se obtiene entonces una ecuación diferencial, que no presenta graves problemas numéricos. Un hecho resaltable de esta fuerza de inducción magnética es que no depende de la densidad del medio al que se aplica; adquiere así importancia creciente conforme nos alejamos del centro y se convierte en fuerza dominante en las partes más externas.

Obtuvimos la intensidad del campo magnético que producía la tensión magnética necesaria para mantener la alta velocidad de rotación no kepleriana del gas periférico. A 100.000 años-luz del centro se precisan unos 5×10^{-6} gauss. Este valor es compatible con las observaciones del continuo de radio. Las supernovas de la población joven del disco producen una gran cantidad de electrones relativistas, que al moverse en trayectorias helicoidales en torno a las líneas del campo magnético emiten radiación de sincrotrón, contribuyendo al espectro continuo de radio en ondas decamétricas. Este hecho permite el cotejo directo de las observaciones con el campo calculado. Efectuado, el resultado fue muy satisfactorio, dentro, por supuesto, de los inevitables errores observacionales y de interpretación, y decisivo para concluir que la explicación magnética de la rotación galáctica es muy razonable y compatible con las condiciones que dicta la observación.

Los valores altos del campo magnético en un disco deben tener como consecuencia secundaria una serie de efectos observables. En primer lugar,

han de producir un ensanchamiento progresivo del disco según nos alejamos del centro, dando a las galaxias vistas de perfil el aspecto de una corbata de pajarita. Este efecto se ha venido atribuyendo a una gravitación decreciente en un disco de agitación turbulenta constante. Sin embargo, algunos autores consideran que no puede darse cuenta cuantitativamente de este efecto mediante semejante mecanismo. Por otra parte, el ensanchamiento del disco por efectos magnéticos no alcanza fácilmente el equilibrio, produciéndose inestabilidades de Parker, que distorsionan el disco y le dan una forma ondulada ("corrugada"). Nuestro equipo en la isla de La Palma ha obtenido mediante el telescopio Isaac Newton, de 2,5 metros, imágenes (publicadas por Florido, Battaner, M. Prieto, E. Mediavilla y M. L. Sánchez Saavedra) que muestran claramente el fenómeno. Hay que decir, sin embargo, que tales ondulaciones podrían deberse a otros fenómenos, como explosiones de supernova frecuentes o la caída de nubes gaseosas del halo.

En definitiva, cabe la posibilidad de que se deba a un efecto magnetohidrodinámico la curva de rotación plana de las galaxias espirales, lo que pone en entredicho la prueba observacional más clara en favor de la materia oscura. (E. Battaner, del departamento de física teórica y del cosmos, de la Universidad de Granada.)

Sangre y vampiros

Disolución de coágulos

Infarto de miocardio, embolias pulmonares y apoplejías se cuentan entre las causas habituales de muerte. Débense a alteraciones vasculares, provocadas por coágulos que taponan venas o arterias. En mi laboratorio de la empresa Schering AG Berlin, hemos encontrado, analizando la saliva de murciélago vampiro, cuatro activadores del plasminógeno distintos de cuantos se conocían: no bloquean la coagulación, aunque sí impiden la formación de trombos, a menudo mortales.

Los murciélagos excitan la fantasía del hombre, más que ningún otro mamífero. En torno a ellos se han forjado leyendas, prácticas supersticiosas y hábitos de comportamiento. Se les relaciona con el conde Drácula y otros ilustres chupadores de sangre, protagonistas de narraciones centenarias y, en las últimas décadas, de numerosas películas.

Sorprendentemente no existen en Europa murciélagos bebedores de sangre que pudieran haber inspirado la superstición popular. Los auténticos vampiros los conocieron los conquistadores europeos en las regiones tropicales del Nuevo Mundo. Sus narraciones sobre ellos se fundieron en el siglo XVII con las leyendas europeas sobre muertos vueltos a la vida.

Los vampiros constituyen una subfamilia de los murciélagos, que consta de varios géneros. El vampiro común (*Desmodus rotundus*) se ha especializado en la succión de la sangre. Ahora bien, la observación atenta de su conducta durante la nutrición nos enseña que, frente a lo que el vulgo cree, no succionan la sangre de sus víctimas. La lamen tras retirar, gracias a sus afiladísimos incisivos, una finísima porción de piel, imperceptible para la presa. De ahí que ya en los años treinta se sospechara la presencia en su saliva de una substancia que bloqueara la coagulación.

Christine Hawkey, de la Sociedad Zoológica Londinense, se dedicó en el decenio de 1960 a la investigación sistemática de esa hipótesis. Halló en la saliva de murciélagos una substancia que presentaba actividad fibrinolítica, esto es, que disolvía la fibrina del coágulo. En 1974, Terence Cartwright, adscrito también a la Sociedad Zoológica Londinense, aisló a partir de la saliva del vampiro una substancia activadora del plasminógeno.

Activadores del plasminógeno los hay en todos los vertebrados estudiados. Transforman el precursor enzimático plasminógeno, muy abundante en la sangre, en su forma activada, la plasmina. Esta es una enzima proteolítica más, como la tripsina, quimiotripsina y elastasa, que se segregan en el jugo intestinal. La plasmina disuelve muy bien la fibrina, proteína responsable de mantener la estructura del coágulo. La plasmina recuerda, en su operación, al agente de tráfico: impide el taponamiento de los vasos y el consiguiente bloqueo del suministro de componentes sanguíneos indispensables para los órganos. En el organismo sano, sólo se forma fibrina a partir de fibrinógeno allí donde se presentan hemorragias; la fibrina teje entonces una malla junto a las plaquetas presentes, taponando la salida de sangre.

Determinadas alteraciones patológicas de las paredes internas de los vasos —arterioesclerosis o patologías venosas— propician la aparición de coágulos en el interior de los vasos, que pueden resultar en infarto de miocardio, embolia pulmonar o apoplejía. En la década de los cincuenta se intentó combatir los coágulos patológicos mediante activadores del plasminógeno. Se empezó recurrien-



El vampiro común Desmodus rotundus, *de unos siete centímetros de longitud, se alimenta exclusivamente de sangre de mamíferos. Caballos, ganado vacuno y cerdos puden ser donantes de sangre involuntarios. La fotografía muestra a un vampiro que lame la sangre de una pequeña herida en un pezón de cerdo. El mismo ha abierto la herida, muchas veces de forma indolora para la víctima, ayudándose de sus afilados incisivos. En contra de la creencia popular, no chupa, sino que lame la sangre que fluye. La saliva del vampiro contiene substancias que disuelven, durante la toma de alimento, la fibrina, que se forma en la herida para cerrar la hemorragia. A diferencia de la sanguijuela, no se impide la coagulación. Esta propiedad reviste máximo interés para nuevos medicamentos trombolíticos, disolventes de coágulos.*

do así a la estreptoquinasa, una proteína de estreptococo. Se utilizó luego la uroquinasa (abreviado PA-u), un activador del plasminógeno presente en la orina humana. Formada en los riñones, coopera en la liberación por las vías urinarias de precipitados de fibrina. La terapia con estreptoquinasa o con uroquinasa implica, empero, ciertos riesgos. Dado que son precisas grandes dosis, se corre el riesgo de desencadenar una activación generalizada de plasminógeno en todo el cuerpo, lo que comportaría la destrucción de proteínas coagulantes imprescindibles. En el peor de los casos se producirían hemorragias incontrolables.

A principios de los ochenta, se pusieron grandes esperanzas en el activador de plasminógeno tisular (abreviado PA-t). Lo sintetizan y liberan las células del endotelio vascular. Fue, además, una de las primeras proteínas que se sintetizaron, en 1983, a través de los nuevos métodos de la bioingeniería, lo que posibilitó su fabricación industrial. PA-t, que presenta una elevada afinidad por la fibrina, ofrecía la ventaja, creíase, de actuar sólo en presencia de ésta, manteniendo incólumes el resto de proteínas sanguíneas. Pero la investigación clínica se encargó de demostrar que apenas si mediaba diferencia entre su aplicación y los tratamientos con estreptoquinasa. Probablemente, las grandes dosis de PA-t requeridas anulaban la selectividad por la fibrina y provocaban idénticas complicaciones vasculares.

Así las cosas mediados los ochenta, emprendí junto a Alejandro Alagón, de la Universidad de México, la tarea de continuar los trabajos de Cartwright. Comprobamos la insólita selectividad por la fibrina que presentaba una substancia de la saliva de los vampiros. Nuestros colaboradores del Schering AG aislarían, desde finales de 1987, las substancias fibrinolíticas y determinarían su secuencia de aminoácidos. Nosotros clonamos los genes e introdujimos en una línea celular especial (proviene del ovario de un hámster), para que se sinteticen las proteínas correspondientes. La primera sorpresa fue el descubrimiento de la existencia de cuatro activadores de plasminógeno. Se parecen bastante al PA-t humano, pero también presentan diferencias características.

Al igual que otras enzimas implicadas en la coagulación sanguínea, el PA-t se estructura en módulos característicos —dominios—, descritos por el bioquímico danés Staffan Magnusson a mediados de la década de los setenta. Se reconoce un dominio en dedo de guante, un dominio de crecimiento (parecido al factor de crecimiento epidérmico, EGF), dos dominios "kringel" (denominados así por su semejanza con un dulce danés de ese nombre) y un dominio proteasa (similar a la tripsina). Los cuatro activadores del plasminógeno de la saliva de vampiro presentan diferencias substanciales respecto a esta estructura.

Para poder desarrollar su actividad, el PA-t tiene que escindirse en un lugar muy preciso por la plasmina, que él mismo genera; con ello se reduce bastante su selectividad por la fibrina. En cambio, la actividad de los activadores de plasminógeno del vampiro en ausencia de fibrina se aproxima a cero. Esperábamos que esta sorprendente selectividad por la fibrina (experimentalmente se ha demostrado que es hasta 500 veces superior a la del PA-t) implicase mejores propiedades farmacológicas.

A diferencia de los tratamientos con PA-t, en los experimentos en animales con dosis terapéuticas de DSPA (abreviatura de activadores de plasminógeno de la saliva de *Desmodus*) no se observó destrucción alguna de fibrinógeno. Tal destrucción constituye un importante indicador de la activación sistémica de plasminógeno que queremos evitar con un nuevo tipo de medicamento contra los coágulos sanguíneos. Se requiere que sólo se destruya la fibrina.

¿Cómo justificar esa insólita selectividad para la fibrina, que ofrece posibilidades extraordinarias para el desarrollo de un nuevo fármaco que disuelva los coágulos? Abordaremos la respuesta desde un enfoque bioquímico y desde una óptica bioevolutiva.

La base molecular de la limitada selectividad para la fibrina que presenta el PA-t ha sido objeto de estudio por distintos grupos de trabajo. Y aunque se disputa sobre los resultados, existe acuerdo en que los dominios en forma de dedo y los dominios "kringel" cooperan en la unión con la fibrina. De ahí que la mayoría de los investigadores hayan considerado responsables de la selectividad a estas regiones.

Los resultados de nuestros estudios señalan, sin la menor ambigüedad, que una forma mutada del DSPA, creada por ingeniería genética, cuyo único elemento es un dominio proteasa, muestra intensa selectividad hacia la fibrina, esto es, se manifiesta activa sólo en su presencia y no se une a ella. Por cuyo motivo, el mecanismo de la selectividad para la fibrina es independiente del mecanismo que la liga. Las razones del primero hay que buscarlas en la influencia alostérica de la proteína sobre el DSPA.

Vayamos con la explicación bioevolutiva. ¿Por qué la saliva de los vampiros no impide la coagulación, a diferencia de otros parásitos que también se alimentan de sangre? La respuesta estriba en que estos murciélagos no succionan la sangre, como la sanguijuela y muchos insectos, sino que la lamen. La economía de su nutrición sería deficitaria si escapara más líquido del que el murciélago pudiera beber. Lo mejor es que se siga sintetizando fibrina para impedir una hemorragia importante. Cuando sea preciso para la toma de alimento, ya se disolverá la fibrina.

Los cuatro activadores del plasminógeno de la saliva de vampiro tienen esta función en la toma de alimento por parte del animal —función muy distinta de la desarrollada por la uroquinasa (el activador de plasminógeno sintetizado por los riñones) y del PA-t, liberado por el endotelio vascular. Su misión no es la destrucción masiva de coágulos, vitales e imprescindibles en heridas, sino la destrucción paulatina de fibrina en relación con la curación de la herida y con inflamaciones. De donde se desprende el interés de dichos activadores de plasminógeno en la terapia de procesos de coagulación patológicos.

La idea de substancias extrañas contra substancias propias tiene numerosos ejemplos en la historia de la medicina. Clásico es el del alcaloide vegetal morfina; al contrario de la endorfina y los opiáceos que nosotros mismos sintetizamos, se revela como un potente calmante. Durante siglos y con fines médicos se han extraído substancias de las plantas, cuya estructura conocemos desde hace ya algunos decenios. Las substancias proteicas no entraron en nuestro bagaje hasta la introducción de las técnicas de la ingeniería genética. Con su empleo ha sido posible investigar proteínas que se presentan en el organismo en concentraciones ínfimas, disponer de ellas en cantidades prácticamente ilimitadas y describir su secuencia aminoacídica. Los activadores de plasminógeno de la saliva del vampiro común *Desmodus rotundus* son una parte infinitesimal del tesoro de principios activos naturales de empleo polivante en medicina. (Wolf-Dieter Schleuning, director del Instituto de Biología Celular y Molecular de investigación farmacológica de Schering AG de Berlín.)

Metodología

El quid está en la pregunta oportuna

Una industria produce cada día una cantidad ingente de componentes eléctricos, de los que probablemente algunos adolecen de defectos de fabricación. Quizá puedan probarse muchas piezas a la vez: una señal luminosa se encenderá cuando todas sean correctas; el piloto apagado denunciará que al menos una es defectuosa; la búsqueda entonces deberá proseguir.

¿Tiene sentido esta forma de proceder? Si el conjunto total se divide simplemente en dos subgrupos, y si el resultado en ambos subgrupos es "defectuoso", entonces la utilidad de todo el procedimiento es muy reducida. Si todas las piezas fueran defectuosas, el número de pruebas necesarias sería mucho mayor que con el procedimiento individual: habría que examinar todos los subgrupos posibles antes de convencerse de que efectivamente todas las piezas eran defectuosas. Está claro, sin embargo, que este caso extremo carece de interés. En la práctica habrá sólo un número limitado de piezas estropeadas, y habrá, pues, subgrupos que sí pasarán la prueba. Y en cuanto uno la pase, nos habremos ahorrado tantos análisis individuales como elementos tenga.

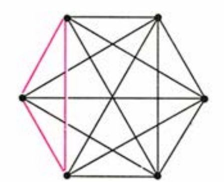
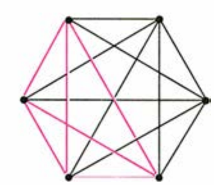
Este mismo principio vale naturalmente, de nuevo, para cada uno de los subgrupos más pequeños en que seguiremos dividiendo los subgrupos que no pasen la prueba; en todo momento se nos presenta la posibilidad de que uno de ellos la pase, con lo que todos sus componentes quedarán aceptados en bloque.

Evidentemente, más se ahorrará cuanto más pequeña sea de entrada la proporción de piezas o muestras defectuosas en el conjunto total. Ya en 1960, el matemático Peter Ungar, del Instituto Courant de la Universidad de Nueva York, demostró el siguiente resultado: si la probabilidad de que una pieza sea defectuosa es menor que $(3-\sqrt{5})/2$ (0,382 aproximadamente), entonces, con un procedimiento de agrupación adecuado, podrá siempre conseguirse que el número de pruebas necesarias para localizar las piezas defectuosas sea menor que el requerido con pruebas individuales.

Pero las estimaciones sobre la amplitud de la búsqueda optimizada son más difíciles de lo que cabría esperar. Sólo muy recientemente ha habido alguien capaz de dar un paso importante en este sentido. Eberhard Triesch, en colaboración con Ingo Althöfer, ha efectuado una estimación del número de pruebas que hay que llevar a cabo cuando el número de piezas defectuosas no es superior a cierta cota máxima r.

Si $r = 1$, cada prueba consiste entonces en especificar un subconjunto y decir si la pieza defectuosa se encuentra en él.

Ese caso especial del problema aparece ya en un conocido juego de niños: un niño piensa un objeto determinado y el resto de sus compañeros deben averiguar cuál es formulando el número mínimo de preguntas de tipo sí-no. El pasatiempo consistente en identificar una moneda falsa de entre una gran cantidad de monedas legales mediante el mínimo número de pesadas con una balanza ordinaria de dos platos pertenece a la misma familia de problemas, así como tam-

Sea un conjunto de seis objetos, de los que dos son defectuosos, pero sin que sepamos cuáles, y hay una prueba capaz de determinar la presencia en un subconjunto dado de dos objetos defectuosos. De entre los 15 segmentos que se obtienen uniendo 6 puntos de todas las maneras posibles, hay por tanto que escoger uno. En estas circunstancias no tiene sentido dividir exactamente en dos el conjunto de 6 puntos y hacer luego la prueba con cada uno de los dos triángulos resultantes (izquierda), *ya que entonces la prueba sólo actuaría sobre 3 de los 15 casos posibles. En el juego de las preguntas, el tramposo que responde con la única intención de dificultarnos lo más que se pueda el hallazgo de la palabra oculta respondería "no" a la pregunta correspondiente. La estrategia más inteligente consiste en probar con un subconjunto de 4 puntos* (seis segmentos posibles, derecha). *Si la respuesta es negativa quedarán aún nueve lados, entre los cuales se encontrará el buscado; para hallarlo se precisarán, de acuerdo con la teoría de la información, al menos cuatro preguntas (ya que tres preguntas bastan para distinguir $2^3 = 8$ objetos solamente). De esta manera, se necesitarán en total cinco preguntas, esto es, una más de las necesarias para hallar una cosa entre 15 (pues $2^4 = 16$).*

bién la cuestión, que poco tiene que ver con los juegos de niños, de colocar una entrada nueva en una lista alfabéticamente ordenada de palabras ya existente. Aquí el objeto a buscar es la palabra inmediatamente detrás, o delante, de la cual deberemos situar la nueva.

En todos estos ejemplos el arte está en formular preguntas inteligentes o —lo que es lo mismo— en elegir subconjuntos adecuados del conjunto total. Así, quien en el juego de las preguntas sabe ya que el objeto buscado es un animal, hará bien en no preguntar: ¿es un elefante?, sino en dividir el reino animal en grupos amplios (terrestres, anfibios, peces, etc.) para reducir luego la búsqueda a uno de estos grupos.

Si uno quiere averiguar el número de preguntas que son necesarias en el peor de los casos o diseñar una estrategia oportuna para tal circunstancia, debe plantearse el caso de tener ante sí a un contrincante tramposo, quien no ha pensado ningún objeto en concreto y siempre contesta a la pregunta que le hacemos con el único norte de ponérnoslo tan difícil como pueda. Habrá siempre, por supuesto, un objeto al menos que pueda corresponder a todas las preguntas que se hayan formulado ya. Una estrategia que pueda triunfar contra un contrincante de semejante pelaje ha de estar diseñada para lo peor. Este es el principio del minimax de la teoría de juegos: se trata de minimizar el espectro de posibilidades que den el máximo conflicto.

Cada frase ha de formularse de suerte tal que el contrario se vea obligado a elegir entre dos subconjuntos de parejo tamaño. De lo contrario, si dividimos las posibilidades en "elefantes" y "no elefantes", daremos al contrario las máximas posibilidades en su labor obstruccionista: "no, no es un elefante". Si los dos subconjuntos son aproximadamente iguales dificultamos la estrategia del contrario.

Con esta estrategia se puede en teoría, con 21 preguntas, identificar un objeto de entre 2^{21} objetos —eso es, de entre más de dos millones. En general, se tiene que el número k de las preguntas que es necesario formular para llegar al objetivo es igual (redondeado por arriba) al logaritmo en base dos del número n de objetos totales. Esto se corresponde con un teorema de la teoría de la información: para numerar un conjunto de n elementos —eso es, para caracterizar individualmente cada uno de ellos— se precisan números binarios de k cifras. La información buscada comporta, por tanto, k bits, es decir k preguntas sí-no.

Cuando r es mayor que 1, el problema se torna más complicado. Para empezar, las soluciones posibles no son ya simplemente los elementos del conjunto a escrutar de partida, sino cualquier subconjunto de r elementos suyos. Por otra parte, aunque ahora se siga la estrategia de dividir el conjunto total en dos subconjuntos, éstos deberán ser iguales no en número de objetos sino en el de posibilidades de solución que cada uno contenga. En tercer lugar, en ambos subconjuntos de la partición efectuada pueden hallarse objetos defectuosos, lo que hace difícil valorar el resultado de la prueba.

A la vista de todas estas dificultades, el resultado de Althöfer y Triesch es sorprendentemente favorable: cuando r es mayor que 1 hacen falta, por supuesto, más pruebas que cuando r es 1; sin embargo, el número de pruebas adicionales, γ_r, depende sólo de r y no del número total de objetos. Puede incluso demostrarse que γ_r no varía si el test empleado se sustituye por otro menos sensible. Se desconoce en general el valor preciso de γ_r. Triesch y Althöfer han demostrado, sin embargo, que podemos aproximarnos a su valor dentro de un cierto margen. Peter Damaschke ha conseguido demostrar que en el caso $r = 2$ basta con una única pregunta suplementaria.

Althöfer y Triesch no prueban su resultado ofreciendo una estrategia concreta; su demostración no es constructiva.

Búsqueda del quark

¿Se han observado por fin los seis sabores?

Es más fácil encontrar la belleza que la verdad. La belleza, quark también llamado "fondo", fue descubierta hace casi veinte años, pero la verdad, por otro nombre "cima", no ha podido ser encontrada en ninguna parte del cosmos, excepto, quizá, en el Laboratorio Fermi del Acelerador Nacional en Batavia, el *Fermilab*.

Hace pocos meses, los físicos de allí han registrado dos "sucesos interesantes" que podrían ser señales del quark cima, dice Melvyn Shochet, portavoz del detector colisionador del Fermilab. "Para que pudiésemos proclamar el descubrimiento del cima, necesitaríamos probablemente de cinco a 20 sucesos, para cada uno de sus varios modos de desintegración", añade.

El cima permanece como el único de los seis quarks cuya existencia no ha sido confirmada. La mayor parte de la materia —esto es, los protones y los neutrones— está formada por los quarks "arriba" y "abajo". Otros sabores —la extrañeza, el encanto y el fondo— se producen sólo en los aceleradores de partículas y, tal vez, en estrellas densas y de gran masa. El cima, si existe, probablemente no ha hecho aparición desde el explosivo y caliente nacimiento del universo.

"Algunos dirían que el descubrimiento del quark cima sería algo así como un anticlímax, pues tenemos muy, muy fuertes razones para creer que existe y conocemos su masa dentro de un cierto intervalo", afirma el premio Nobel Steven Weinberg, de la Universidad de Texas en Austin. "Quizá dé la impresión de que no es importante que sepamos con precisión la masa del quark cima. Pero la verdad es que encierra el máximo interés."

El quark cima proporcionaría una pista esencial para saber por qué las

partículas tienen las masas que tienen. En particular, a los físicos les desconcierta que cada partícula fundamental posea dos compañeras que le son iguales en todos los sentidos excepto en la masa. Por ejemplo, el quark fondo responde a las fuerzas débil, fuerte y electromagnética del mismo modo, casi, que los quarks extraño y abajo, pero el fondo tiene una masa 25 veces mayor que el extraño y 700 veces mayor que el abajo.

Para explicar por qué unas partículas se hallan dotadas de mayor masa que otras, se han ideado varias teorías, la más simple de las cuales es el mecanismo de Higgs. De acuerdo con ella, tal y como la carga eléctrica de una partícula está relacionada con la intensidad con que interacciona con los campos electromagnéticos, la masa de una partícula tiene que ver con la intensidad de acoplamiento al campo de Higgs, que se manifestaría en los experimentos como un nuevo tipo de partícula, el bosón de Higgs. "Una medida precisa de la masa del quark cima nos acercaría a la respuesta de las preguntas: ¿Existe una partícula de Higgs? ¿Cuál es su masa? ¿Qué tipo de experimentos debemos hacer para encontrarla?", explica Weinberg.

Pero, ¿por qué es tan difícil crear quarks cima, con lo sencillo que es hoy hacer que aparezcan quarks fondo? En primer lugar, porque son pesados. Los experimentos del Fermilab muestran que el quark cima tiene al menos tanta masa como un átomo de plata y más de 20.000 veces la del quark arriba. Se producen allí partículas de tanta masa lanzando protones contra antipartículas suyas. La colisión libera 1,8 billones de electronvolts de energía, que podrían bastar, o no, para generar quarks cima.

La segunda razón de que el quark cima eluda la detección es su extrema inestabilidad. Nadie espera que el quark cima se mantenga más de una billonésima de billonésima de segundo. Se desintegra dando un surtido de partículas secundarias, que pueden entonces ser detectadas.

Para encontrar un solo suceso interesante, los investigadores de Fermilab y sus sistemas de computación deben buscar entre miles de millones de sucesos, en algunos de los cuales aparecen cientos de partículas. Entonces, si encuentran uno que se parezca a la desintegración de un quark cima, deben probar que no ha sido producido por una docena de procesos que pueden imitar la señal del quark cima. "Cuando se encuentra sólo un suceso", dice Shochet, "no hay manera de determinar si es o no es el quark cima".

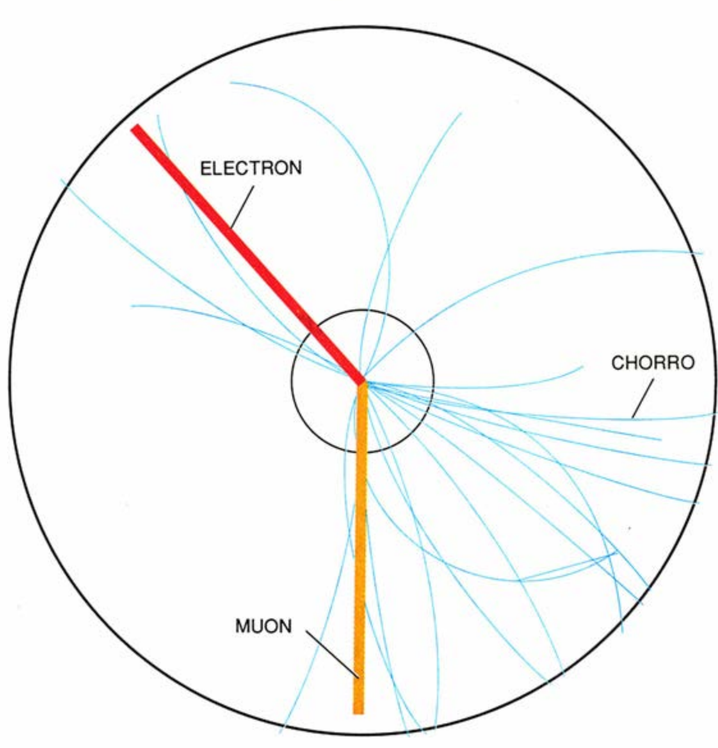
El detector colisionador del Fermilab ha registrado recientemente un posible suceso de quark cima, y el *D-Zero*, el más reciente de los dos gigantescos instrumentos del Fermilab, ha observado un segundo. Cada uno de los sucesos consiste en una cascada de partículas que puede ser la consecuencia de la desintegración de un quark cima y su contrapartida de antimateria, el quark anticima.

Cada una de estas dos partículas se desintegra en un quark fondo y una partícula *W*, más conocida por ser la transmisora de la fuerza débil. Entonces, el quark fondo se desintegra, y produce chorros de partículas más corrientes. La partícula *W* se desintegra bien sea en un electrón, bien sea en el hermano de ésta, el muon. Así, lo que realmente se ha medido en Fermilab es un electrón y un muon energéticos y varios chorros. Pero cabe la posibilidad de que estas partículas se generen por la desintegración de algo que no sea el par cima-anticima.

Las observaciones del Fermilab incluyen otra pequeña prueba que avala la hipótesis del quark cima. El quark fondo producido en la desintegración del cima puede juntarse con otro quark y formar una partícula estable. Esta partícula, que se moverá a una velocidad cercana a la de la luz, viajará unos pocos milímetros antes de romperse en chorros de partículas más ligeras. A fin de identificar esta señal, los expertos del Fermilab han añadido un "detector de vértice" al detector colisionador; el aparato distingue entre partículas que se desintegran en el centro del detector y partículas que se rompen una pequeña distancia más allá. El detector de vértice debería permitir a los investigadores identificar los quarks fondo sin ambigüedad, y así hacer más fácil el reconocimiento de un suceso de quark cima.

Uno de los dos sucesos presentados como una desintegración de quark cima parece mostrar chorros formados más allá del centro del detector, lo que sugiere la desintegración de un quark fondo. Pero los investigadores del Fermilab aún no tienen suficiente experiencia con el nuevo detector de vértice como para estar seguros de sus mediciones. "Lo que realmente necesitamos es una gran cantidad de colisiones a analizar, de modo que produzcamos suficientes objetos como éstos y podamos ver la señal por encima del ruido de fondo", comenta Shochet.

Les sobran razones para andar con cautela. En 1985 investigadores del CERN, el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, anunciaron el descubrimiento del quark cima, cosa que más tarde resultó ser falsa. Hará unos tres años, los del Fermilab registraron un candidato a quark cima, pero las pruebas no fueron concluyentes. Sin embargo, ahora puede, pero sólo puede, que los físicos conozcan pronto la verdad.



¿El quark cima? Los físicos del Fermilab detectaron en 1989 un suceso que consistía en un electrón, un muon y muchos chorros de partículas. El suceso quizás indicase la desintegración de un quark cima y su compañero de antimateria. El Fermilab ha registrado recientemente dos señales similares.

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Contra corriente

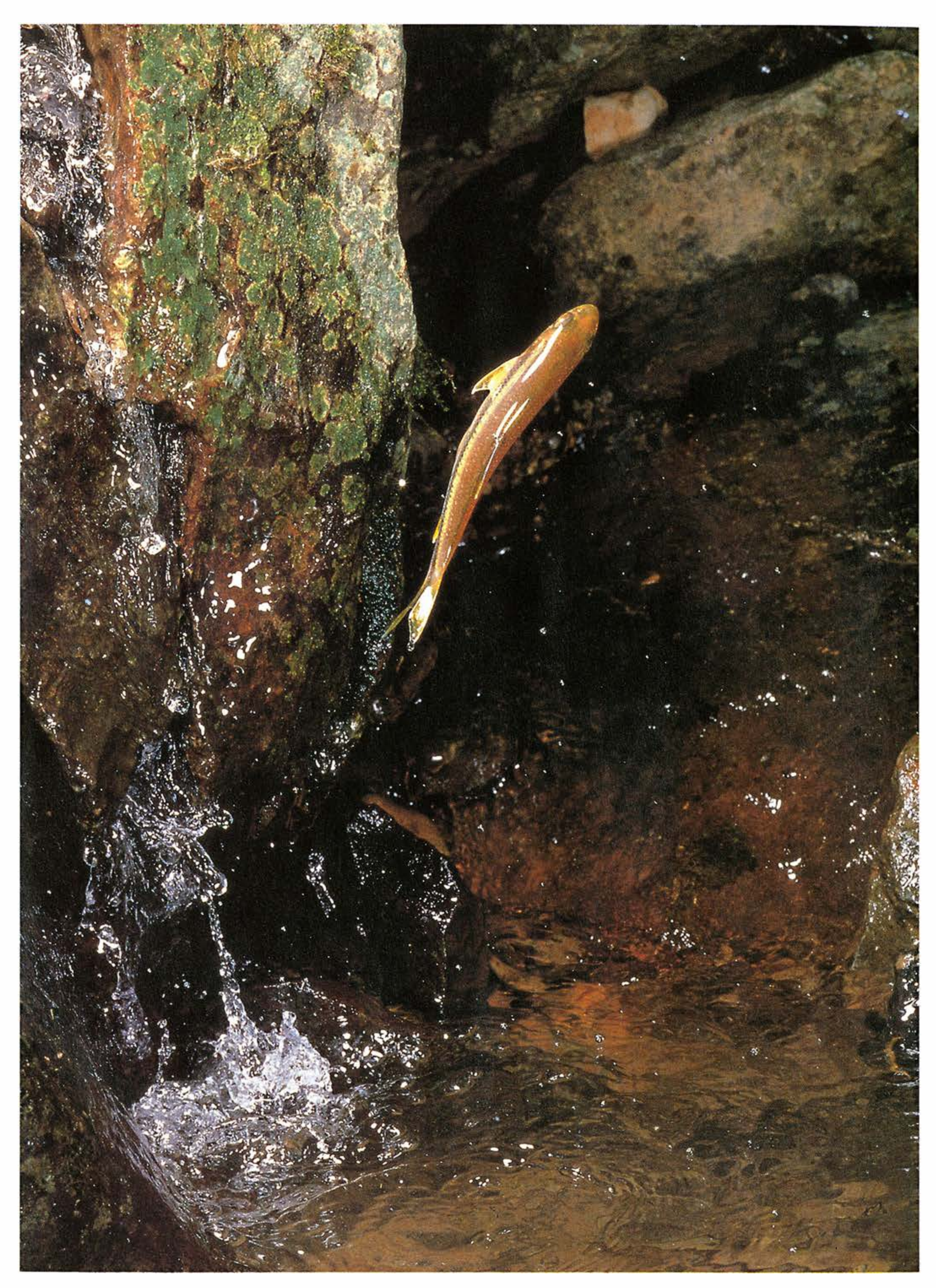


Entre la riqueza faunística de los ríos de Japón hay un pez que goza de particular aprecio. Se llama "kawamutsu". Los primeros naturalistas ingleses que visitaron mi país, maravillados también por su conducta, le denominaron, en traducción casi literal y debido a la morfología externa, escómbrido de río.

Habita en los cursos ruidosos que bajan, saltando, de las montañas. Se le ve, sobre todo, en los remansos y confundido con la espuma de las cascadas. El kawamutsu no soporta el deterioro del medio. Y es en esa situación, justamente, cuando pugna con mayor brío por buscar aguas más limpias, corriente arriba.

¿Cómo lograr captar esos momentos de belleza simpar? Valió la pena, también para mí, luchar contra la dureza del medio. Me coloqué junto a una de esas cabelleras de agua que menudean en el interior del archipiélago. Situé el sensor en el lugar más idóneo, de suerte que se disparase el obturador en cuanto el pez estuviera en el aire. Fracasé en mi intento una y otra vez. No acertaba a fijar la sensibilidad necesaria, hasta que la suerte y, diríase, la colaboración de los kawamutsu que saltaban incansables, facilitaron la tarea.

Foto de la derecha
distancia focal: 105 mm
diafragma: F = 22
exposición: 1/20.000 de segundo
película: ISO = 100



Pantallas planas

Gracias a los últimos progresos en microelectrónica y cristales líquidos, ya son posibles las pantallas murales y las de pulsera

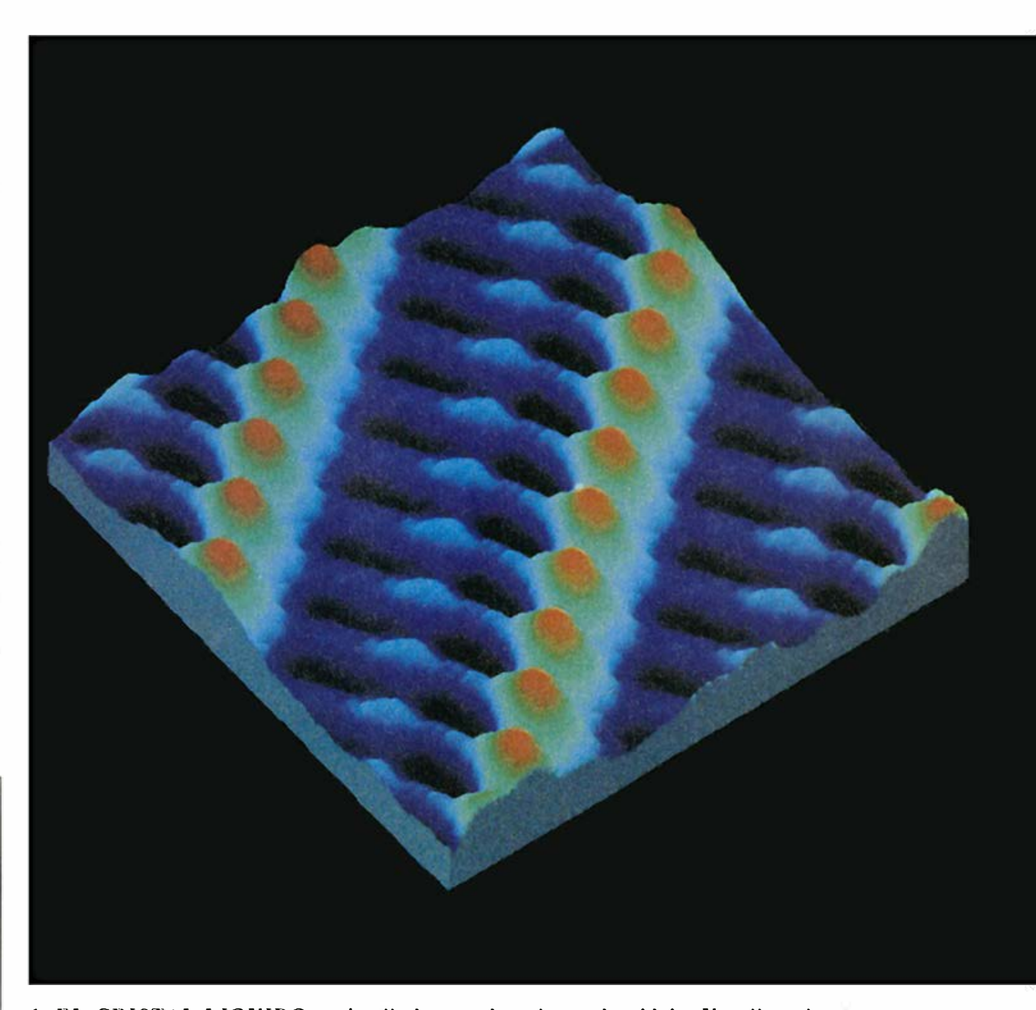
Steven W. Depp y Webster E. Howard

La técnica más utilizada para la exhibición de imágenes en pantalla sigue siendo la del tubo de rayos catódicos (TRC). Sin embargo, es difícil obtener, partiendo de ella, pantallas portátiles que consuman poca energía y, pese a ello, ofrezcan imágenes de calidad. Cada vez que se ha intentado construir una pantalla plana ligada a un TRC, se han conseguido imágenes de calidad mediocre, o los diseños han sido demasiado complejos y de muy cara fabricación. En la más reciente tentativa en ese sentido, se reemplaza el cañón electrónico de barrido por una serie de diminutos emisores de electrones, montados sobre una placa y recubiertos por otra. Entre ambas placas hay que colocar unos separadores que deberán ser, para resistir el vacío existente entre las placas, o grandes o numerosos; en cualquier caso, oscurecerán la imagen. Todavía no se ha encontrado una solución satisfactoria a este problema.

Una pantalla plana ideal ha de producir imágenes con buena luminosidad, marcado contraste, alta resolución, rápida respuesta, numerosos matices de gris y todos los colores del arco iris. También debe ser resistente, duradera y de bajo coste. Las tres técnicas que han logrado cierta aceptación en el mercado —la de los paneles de plasma, la de las pantallas electroluminiscentes y la de las pantallas de cristal líquido— se quedan cortas en alguna de estas cualidades, pero una cuarta, que acaba de comercializarse, ofrece imágenes que rivalizan con las de los TRC, y en algunos casos las superan: se trata de las pantallas de cristal líquido (PCL) con matrices activas; ninguna otra suma hoy más recursos de investigación y desarrollo, y mayores inversiones para su fabricación.

Cuando empezaron a desarrollarse las primeras pantallas planas, nadie había pensado todavía en los dispositivos de cristal líquido con matrices activas. Se ensayaron muchos

STEVEN W. DEPP y WEBSTER E. HOWARD, del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM en Yorktown Heighs, estudian las técnicas de reproducción de imágenes en pantalla. Depp, que dirige el grupo de sistemas de entrada, se doctoró en física en la Universidad de Illinois en 1972. Howard, doctor en física por Harvard, encabeza la investigación sobre física de semiconductores, electroluminiscencia de capa delgada y pantallas de cristal líquido con matriz activa.



1. EL CRISTAL LIQUIDO está sellado por dos placas de vidrio. Una lleva los transistores que controlan los electrodos de cada célula; la otra porta los filtros de color y un electrodo que cierra todos los circuitos. Polarizadores delanteros y traseros completan el sistema, que se ilumina desde atrás. En la microfotografía, obtenida por barrido con efecto túnel, se aprecian las moléculas de cristal líquido, fijas al sustrato.

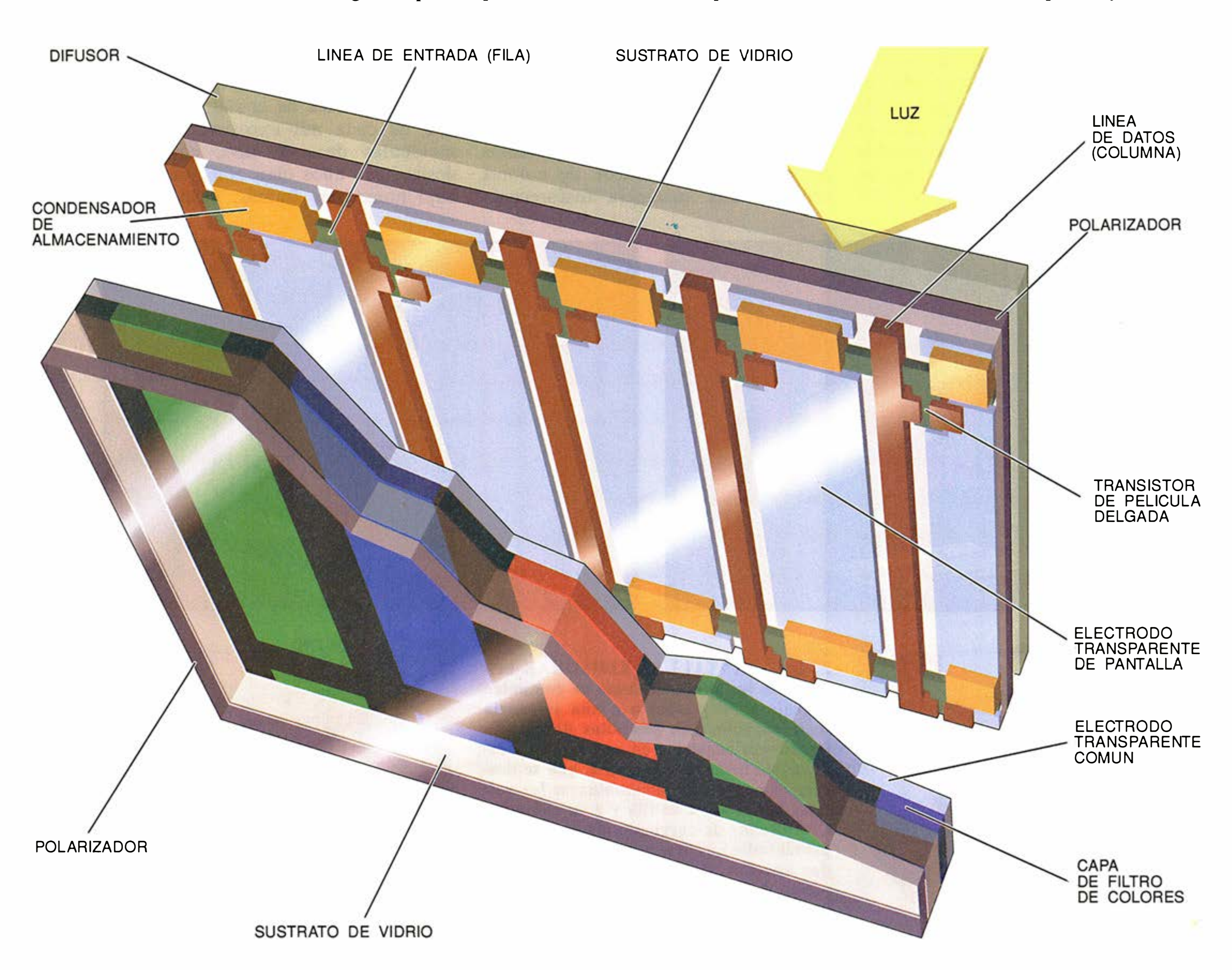
sistemas de producción o modulación de la luz según patrones controlados. La primera técnica empleada (a finales de los años sesenta) recurría a los plasmas, o descargas en gas.

La pantalla de plasma consta fundamentalmente de dos láminas de vidrio en las que se han imbricado respectivas series de cintas paralelas de película conductora; las láminas están dispuestas de manera que dichas series de líneas se crucen. Entre una y otra lámina hay un intervalo espacial lleno de una mezcla de gases, donde no suele faltar el neón. En cualquier punto de intersección, un voltaje suficientemente elevado producirá una descarga en el gas; éste se descompondrá en un plasma de electrones y iones, que, excitado por una corriente, emitirá luz. El sistema se comporta como una red de lámparas de neón en miniatura, y, por tanto, constituye una pantalla "emisora".

Como la ionización del gas se produce cuando se le aplica un voltaje bien determinado, es fácil controlar qué intersecciones se iluminan y cuáles no. Para ello basta con aplicar un voltaje igual a la mitad del umbral de encendido a una fila y una columna dadas, porque así sólo donde éstas se corten habrá voltaje suficiente para que la descarga se produzca. Con el barrido de una fila tras otra, y repitiendo el proceso al menos 60 veces por segundo, se puede conseguir que el ojo perciba una imagen estable. Esta imagen será necesariamente poco luminosa, debido a que cada punto concreto sólo puede brillar durante una pequeña fracción del tiempo. Pese a tal inconveniente, este diseño se ha aplicado en los ordenadores portátiles y en otros muchos productos.

En esa misma línea, se consiguen imágenes más brillantes por medio de la corriente alterna. H. Gene Slottow y Donald L. Bitzer, de la Universidad de Illinois, descubrieron que la corriente alterna producía un efecto de memoria inherente, puesto que una celdilla recién excitada retiene brevemente parte de la carga en sus electrodos aislados. Cuando se invierte el voltaje, esta carga se añade a cualquier nueva diferencia de potencial que se aplique y, en consecuencia, desencadena otra vez la descarga. Como los elementos que constituyen la imagen (los píxeles) se encienden cada vez que el voltaje se invierte, la emisión de luz tiene lugar durante una proporción de tiempo mucho mayor. En un principio, los plasmas de corriente alterna despertaron el interés por su efecto de memoria, pero hoy en día, que las memorias de semiconductores son tan económicas, las virtudes de estas pantallas que aún cuentan son su luminosidad, robustez y fiabilidad. Resultan muy adecuadas para uso militar.

La mayoría de las pantallas de plasma son de color naranja. No es fácil modificar su diseño de manera que se obtengan imágenes polícromas, característica que hoy en día



los usuarios esperan encontrar en el producto (más del 80 % de los monitores que se venden actualmente son de color). La generación de color requiere tres fuentes diferentes, una de las cuales emite en rojo y las otras, en azul o verde. Pero no sería práctico conseguir esos colores llenando cada píxel con un gas diferente. De ahí que se haya optado por emular el proceso que tiene lugar en los tubos fluorescentes: se genera una emisión de luz de un tipo determinado, que da a continuación lugar a luz de distintos colores por medio de revestimientos fosforescentes. Un único gas, el mismo para todo el conjunto, emite luz ultravioleta, y esta radiación invisible provoca que cada celdilla radie luz de color rojo, azul o verde, según la naturaleza del pigmento fosfórico que la recubra.

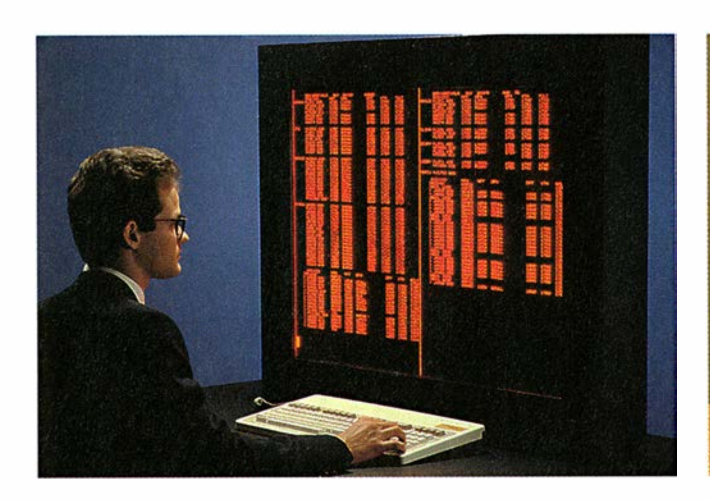
Las pantallas de plasma consumen gran cantidad de energía; por ello se las utiliza principalmente en aplicaciones que no requieran alto rendimiento energético ni facilidad de transporte. Pero podemos construir con ellas paneles de hasta 1,5 metros de diagonal, dimensiones suficientes para una pantalla de televisión de alta definición que se colgase en la pared. Si los paneles de plasma en color alcanzaran un precio razonable y una elevada fiabilidad, podrían destinarse a tal fin.

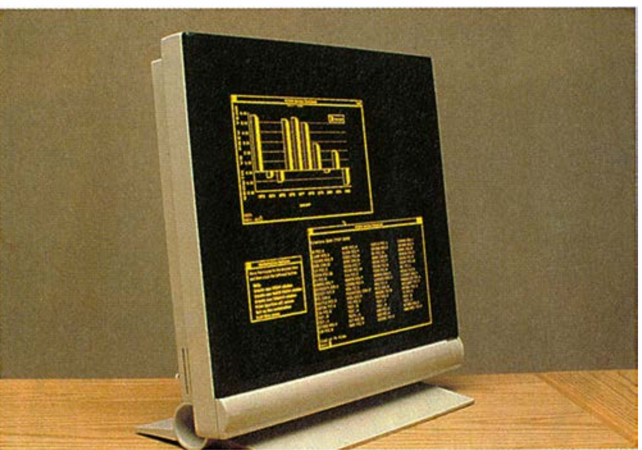
Otra importante técnica del tipo de la pantalla emisora plana se basa en el fenómeno de la electroluminiscencia de capa delgada. Al principio, se esperaba aprovechar la electroluminiscencia para el alumbrado de viviendas, hasta que se comprobó el pobre rendimiento de la técnica, y sus dispositivos terminaron utilizándose en la fabricación de pantallas alfanuméricas, en competencia con las pantallas de plasma.

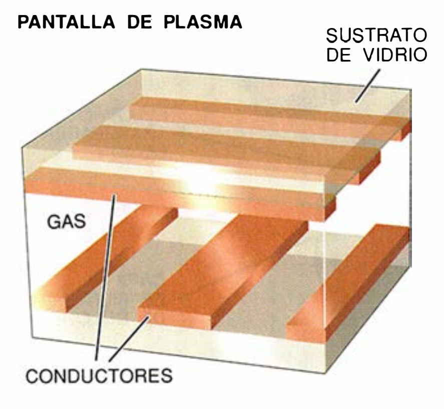
Al igual que los dispositivos de descarga gaseosa, una pantalla electroluminiscente se asemeja a un emparedado. El emisor de luz, una sustancia fosforescente —generalmente sulfuro de cinc dopado con manganeso—, se coloca entre dos capas aislantes portadoras de electrodos ortogonales. Cuando el voltaje supera un valor umbral bien definido, el emisor se descompone y conduce corriente. Esta corriente excita los iones de manganeso, que emiten una luz de color amarillo, análoga al brillo del neón de la pantalla de plasma.

Aunque estas pantallas duran bastante, presentan dos inconvenientes importantes: no pueden producir imágenes a todo color, y consumen casi tanta energía como las pantallas de plasma. La obtención de colores requiere una sustancia fosforecente que sea buena emisora de azul, pero hasta ahora no se ha encontrado ninguna que ofrezca la luminosidad, eficiencia y longevidad adecuadas. Asimismo requiere una escala de grises de gradación progresiva, cualidad que ha resultado difícil de controlar. Por otra parte, la eficacia de estos paneles disminuye a medida que aumenta el número de elementos de imagen que los constituyen. Cada uno de estos elementos se comporta como un condensador, y la simple carga y descarga de todos ellos precisa cantidades de energía apreciables. Este problema dificulta el uso de paneles electroluminiscentes con alto contenido de información en aplicaciones alimentadas por baterías.

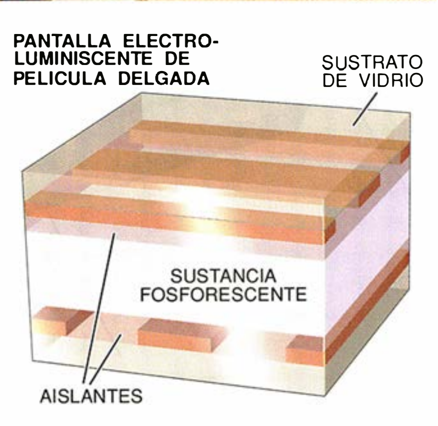
La tecnología no emisora primaria se vale de las propiedades electroópticas de los cristales líquidos (CL), un tipo de moléculas orgánicas. Como su nombre indica, se trata de compuestos que fluyen igual que los líquidos, si bien presentan una ordenación cristalina. Esta fase de la materia no es tan rara como podría creerse. Se ha estimado que un químico orgánico que sintetizara compuestos al azar produciría moléculas con propiedades de cristal líquido en uno de cada mil experimentos. Las moléculas de este tipo, conocidas desde hace unos cien años, aparecen bajo numerosas formas, desde la de







2. LAS PANTALLAS EMISORAS brillan con luz propia cuando se comunica energía a un plasma o a una sustancia fosforescente. Las pantallas de plasma (*izquierda*) consisten en una red de lámparas de neón en miniatura, que se descargan una a una al combinarse los voltajes aplicados a su fila y a su columna. Los diseños de corriente alterna (no representados) retienen carga en electrodos aislados, creando un efecto de memoria. Las pantallas electroluminiscentes de película delgada (*derecha*) reemplazan el gas del diseño anterior por una película de sustancia fosforescente sólida.

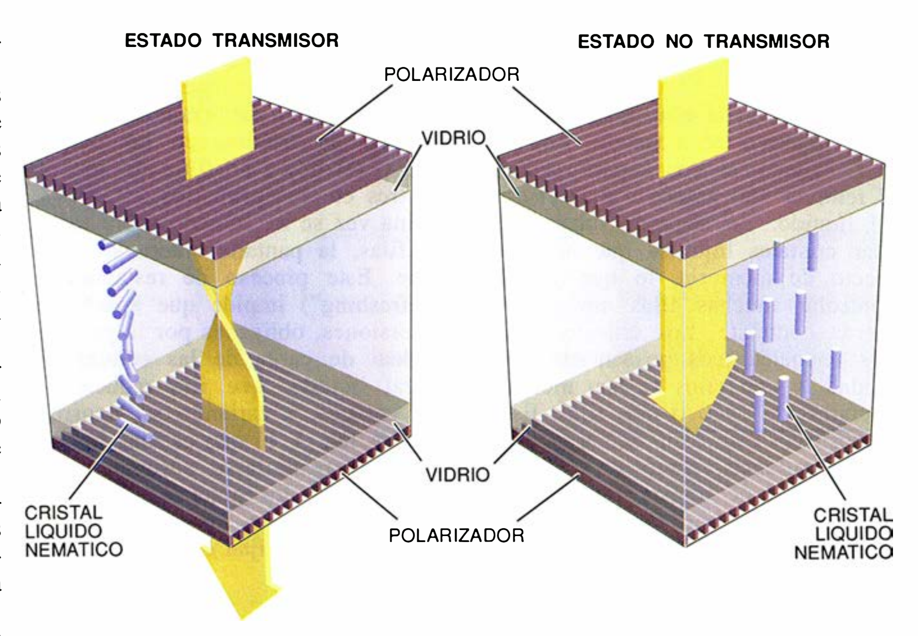


membranas celulares hasta la de espuma jabonosa.

Los CL más importantes son los compuestos nemáticos, con forma de trenzas. Cada una de sus alargadas moléculas con aspecto de vara tiene libertad de moverse con respecto a las demás, si bien existen sutiles fuerzas intermoleculares que tienden a mantener alineados sus ejes; el efecto recuerda un tanto el modo en que se mueve un banco de peces. Puede fijarse la dirección de alineación de las moléculas o mediante su exposición a un campo eléctrico o colocándolas en las proximidades de una superficie preparada para ello. El control de dicha alineación permite regular, asimismo, las propiedades ópticas del material, y muy especialmente el efecto que tiene sobre la transmisión de luz.

En una configuración habitual, se empareda uno de estos compuestos de cristal líquido entre dos láminas de vidrio con diferentes alineaciones moleculares. Para obtener semejante CL, del tipo "nemático con torcedura", se reviste la cara interior de cada una de las láminas con una película transparente que sea conductora eléctrica: de óxido de indio y estaño, por ejemplo. A continuación, se añade una capa delgada de un polímero orgánico, y finalmente se lo "cepilla" en la dirección deseada. El "cepillado" alinea el polímero por la combinación de sus cadenas, mediante diminutos raspados o por ambas cosas. Estos fenómenos de superficie se transmiten a sí mismos a las moléculas adyacentes del cristal líquido a través de un mecanismo todavía no aclarado. El trenzado de las hebras moleculares se consigue colocando las láminas de vidrio de forma tal que sus orientaciones preferentes se crucen ortogonalmente.

Cuando se dirige un haz de luz polarizada sobre una célula de cristal líquido, la dirección de polarización tenderá a seguir la rotación del trenzado, y saldrá del emparedado habiendo girado, por lo tanto, 90 grados. Los polarizadores cruzados que están a un lado y otro de la célula dejan pasar la luz en vez de bloquearla, al contrario de lo que sucedería si la célula no estuviera presente: es el llamado estado de transmisión ("on"); el estado de no transmisión ("off") se produce al aplicar un campo eléctrico a través de los dos conductores transparentes, lo cual orienta las moléculas del cristal líquido de manera que sus ejes sean paralelos a las líneas del campo. Esta realineación deshace la anterior configuración de trenzado y, por tanto, la célula en cuestión no hará girar la polarización de la luz incidente. La célula no ejerce ya ningún efecto óptico apreciable, y los polarizadores cruzados bloquean, como sucede normalmente, el paso de la luz. En una célula real, la transmisión varía gradualmente con el voltaje aplicado.



3. EL OBTURADOR POR ROTACION DE LA LUZ se utiliza en la mayoría de las pantallas planas no emisoras. Las moléculas de cristal líquido nemáticas, con forma de trenzas, se disponen de manera que gire el plano de polarización de la luz. Los píxeles no activados dejan pasar la luz hacia un segundo polarizador (*izquierda*). Cuando se aplica un voltaje, se deshace la rotación, y la luz queda bloqueada (*derecha*).

Hasta aquí hemos descrito lo que sucede en un píxel. La pantalla de cristal líquido consta de un gran número de ellos. Se colocan los electrodos de filas en uno de los sustratos de vidrio y los electrodos de columnas en el otro; de esa manera, cada punto de intersección define la dirección de un píxel diferente. Dado que la luz proviene de un reflector o fuente luminosa, la matriz se comporta como una red de minúsculos obturadores gobernados electrónicamente. La simplicidad del diseño y los moderados valores de voltaje y energía que requiere su funcionamiento, determinan que estas PCL de "matriz pasiva" sean las pantallas planas más vendidas en la actualidad.

Sin embargo, la misma simplicidad de la técnica marca un límite inflexible a sus prestaciones. Como Paul M. Alt y Peter Pleshko de IBM han demostrado, sólo puede mejorarse la resolución de estos dispositivos si se sacrifica el contraste. El problema tiene su origen en el entrecruzamiento de voltajes, inherente al sistema de excitación de los píxeles. En efecto, primero se aplica un voltaje a una sola fila, y se ajustan los voltajes de las columnas de forma tal que produzcan un gran voltaje total sobre los píxeles seleccionados en dicha fila; los que no son seleccionados reciben un voltaje menor.

El proceso continúa con la alimentación de la fila siguiente, en un proceso que barre de arriba abajo en una sexagésima de segundo, y a continuación se repite para el cuadro siguiente. Durante la proyección de un cuadro de vídeo, cada píxel seleccionado recibe un pulso de voltaje elevado cuando se activa su fila, los no seleccionados reciben voltajes moderados y todos los píxeles sufren pulsos entrecruzados de menor magnitud procedentes de las demás filas, cuando éstas se activan.

Dado que este entrecruzamiento aumenta con el número de filas, la diferencia de voltaje efectivo entre los píxeles seleccionados y los no seleccionados va disminuyendo a medida que crece el tamaño de la red. Si hay 240 filas —menos de la mitad que la pantalla de un televisor corriente—, dicha diferencia descenderá hasta un 6,7 % solamente. Por el contrario, la obtención de un contraste aceptable para una célula nemática girada 90 grados exige una diferencia de voltajes de un 50 %, por lo menos.

Hay tres estrategias para soslayar el conflicto entre contraste y resolución. En primer lugar, se puede intentar que la curva de transmisión-

voltaje tenga una pendiente mayor, de manera que unas diferencias pequeñas en voltaje produzcan grandes variaciones en la transmisión de luz. Este objetivo se consigue con las PCL "nemáticas con supertorcedura" al retorcer 180 grados o más el cristal líquido. En segundo lugar, cabe usar cristales líquidos que muestren efecto de memoria, lo que permite controlar muchas filas sin que se pierda contraste. Los cristales líquidos ferroeléctricos poseen esta propiedad, y con ellos se han montado pantallas de 1000 o más filas. Estos dispositivos son, sin embargo, algo lentos. Además, como sólo admiten dos estados de transmisión estables, no reproducen con facilidad las diversas tonalidades de grises. Por todo ello, la tecnología de matrices pasivas resulta menos adecuada para la reproducción de vídeos o de imágenes realistas.

La tercera estrategia, mucho más radical, divide las funciones de control y de transmisión, de forma tal que cada una de ellas pueda optimizarse por separado. Este control por medio de "matrices activas" se basa en el empleo de un conjunto de transistores, cada uno de los cuales activa un píxel diferente. Cada píxel recibe un voltaje de su línea de columna sólo cuando se enciende el correspondiente transistor. Se puede actuar sobre las otras filas cuando el transistor está apagado; entretanto, el píxel mantiene el voltaje que se le había suministrado inicialmente. Dado que este método aísla del entrecruzamiento a los píxeles, el número de filas controlables puede ser altísimo. Además, esta técnica genera colores con facilidad. Los píxeles y sus respectivos transistores se agrupan en tríadas, en las cuales cada píxel posee un filtro de uno de los tres colores primarios.

Una vez se ha actuado sobre todas las filas, la pantalla entera se reescribe. Este proceso de restauración ("refreshing") impide que aparezcan distorsiones, obligadas por la pérdida gradual de carga de las células de cristal líquido, que iría reduciendo sus voltajes y variando su transmisión de luz. Y lo que es más importante, al restaurarse sesenta veces por segundo, los píxeles pueden reproducir imágenes de vídeo y otras imágenes que exijan cambios de pantalla rápidos.

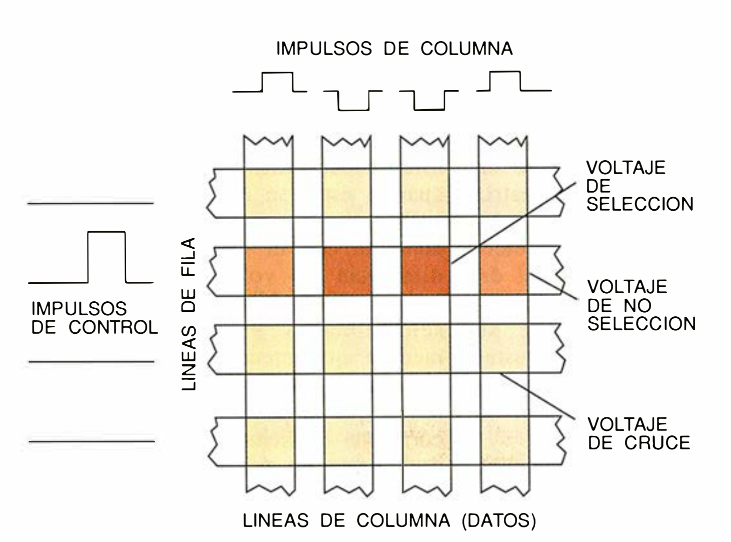
Las pantallas de matriz activa se parecen mucho a las pastillas de memoria dinámica de acceso aleatorio (DRAM, *dynamic random-access memory*). Tanto aquéllas como éstas son circuitos integrados complejos que almacenan cargas en aproximadamente un millón de posiciones discretas, cada una de ellas controlada por un solo transistor. Sin embargo, el ordenador lee en una pastilla DRAM una fila cada vez nada más, detectando la carga existente en cada posición, mientras que el ojo humano lee la pantalla entera de una vez.

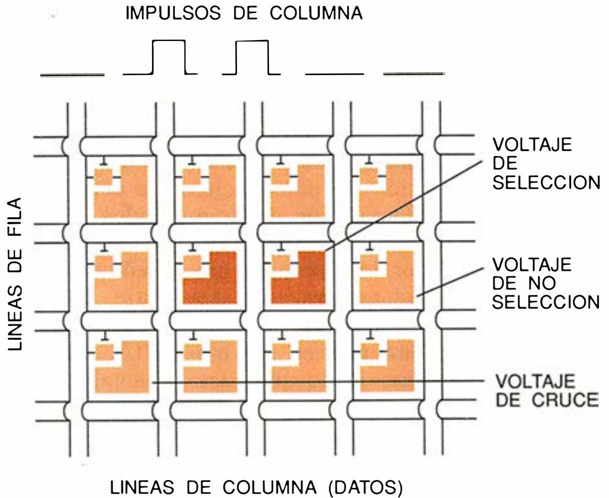
Otra diferencia consiste en que las DRAM almacenan datos digitales, y las pantallas de matriz activa, datos analógicos. En las primeras, cada célula debe hallarse en estado de transmisión ("on") o en estado de no transmisión ("off"); en las últimas, los voltajes de las células han de variar en una escala continua de grises. Esta cualidad requiere que la pantalla "codifique" mucha más información que la que admite una pastilla DRAM de un tamaño parecido.

Este requisito se ha podido cumplir merced a un diseño cuidadoso y al control de las tolerancias de fabricación. Para nuestra fortuna, éstas sólo han de aplicarse a pequeña escala, de un píxel al contiguo, y ello se debe a que, pese a ser sensible a las variaciones locales que se producen en los bordes de los objetos, el ojo apenas percibe las variaciones que van creciendo de forma gradual a medida que barre la pantalla de un lado a otro.

Las pantallas de matriz activa se controlan mediante transistores de película delgada (TPD), técnica que ha desarrollado su potencialidad sólo en los últimos diez años, y cuyo origen está en la fabricación de células solares. Se construyen en grandes conjuntos a coste comparativamente reducido. Su único inconveniente —su menor capacidad de transporte de corriente— apenas tiene importancia cuando se los utiliza en pantallas, ya que se necesita muy poca corriente para controlar un cristal líquido.

En el transistor de película delgada se utilizan capas depositadas de diferentes materiales para formar el semiconductor, los aislantes y los electrodos. Igual que sucede en los transistores habituales, dos terminales conducen la corriente, y un ter-





4. PASIVO FRENTE A ACTIVO: en las matrices de cristal líquido pasivas (*izquierda*) se envía un impulso de dirección a todos los píxeles de una fila, y se suma o resta el voltaje de una columna. En las células no seleccionadas se cruzan voltajes, cuyo valor medio aumenta con el número de columnas; se crea así un conflicto entre contraste y resolución. Las matrices activas (*derecha*) lo evitan dirigiendo cristales líquidos mediante transistores de película delgada. Mientras los transistores están activados, las celdillas de cristal líquido asociadas se cargan a los voltajes de las líneas de columna, también llamadas líneas de datos; desactivados, los voltajes se mantienen constantes. De este modo, se puede formar una imagen fila por fila, que persistirá hasta el siguiente "ciclo de restauración".

cero activa y desactiva el transistor. Sin embargo, cuando se trata de transistores convencionales la mayoría de esos elementos se forman en la superficie de un cristal semiconductor único, cuyas propiedades eléctricas en determinadas regiones se modifican mediante la adición de átomos donadores de cargas ("dopantes"). En cambio, los TPD se pueden fabricar casi sobre cualquier superficie, incluso sobre vidrio común.

Fueron precisos 20 años para convertir los TPD en productos comerciales. Cuando Paul K. Weimer, de la compañía RCA, inventó esa técnica en 1962, los expertos confiaban en que encontraría aplicación en los circuitos electrónicos corrientes. Sin embargo, enseguida fue desplazada por otros dispositivos electrónicos, lo que apartó del trabajo en ella a la mayoría de los investigadores. En 1974, T. Peter Brody y su equipo, de la empresa Westinghouse, demostraron que los TPD podían utilizarse como interruptores en las pantallas de cristal líquido. Incluso este uso era difícil en aquella época, porque con los materiales y procesos disponibles no podían obtenerse grandes series de dispositivos estables y libres de defectos.

Se probó con diversos semiconductores. El silicio policristalino fue el primero en emplearse en un producto comercial. Ocurría en 1984, y el aparato, un televisor de bolsillo fabricado por Seiko-Epson, con una pantalla de cinco centímetros. Pero ésta se fabricaba mediante costosos procesos de circuitos integrados y tratamiento de materiales a altas temperaturas. El futuro apuntaba hacia otro material, el silicio amorfo. En 1979, el grupo encabezado por P. G. LeComber, de la Universidad de Dundee, vio que el silicio amorfo, ya por entonces en desarrollo para uso en células solares de poco costo, era adecuado para TPD destinados a las pantallas.



5. ESTA TELEVISION DE PARED figuraba en *Desafío total*, película de 1990, como muestra de la vida en el año 2084, pero productos similares deberían llegar al mercado antes de diez años. Cuando no se utilicen para presentar imágenes, podrán imitar el dibujo del papel pintado de la pared, mostrar obras de arte procedentes de un fichero digital o servir de interfaz con una red de ordenadores.

Son varios los procesos clave en la fabricación de los TPD. En primer lugar, se forma el sustrato con un vidrio purificado de metales alcalinos, que podrían contaminar los transistores o el cristal líquido. El vidrio fundido se vierte, en un proceso ideado por Corning y cuidadosamente controlado, para crear una lámina tan plana que, si la imaginásemos del tamaño de un campo de fútbol, su espesor variase menos que el grosor de un lápiz.

A continuación, se deposita la capa de semiconductor mediante un proceso de plasma que utiliza gas silano, SiH_4, a baja presión. Una descarga eléctrica ioniza el gas y disgrega las moléculas en fragmentos, que se condensan sobre el vidrio, donde forman una red aleatoria de silicio, rica en hidrógeno. La presencia de hidrógeno es crucial, puesto que cierra los enlaces rotos que, si no, atraparían electrones y destruirían el semiconductor. Finalmente, los electrodos metálicos, los aislantes y demás elementos del TPD se depositan de forma similar a la habitual en la fabricación de circuitos integrados, con la diferencia de que el área a cubrir es mucho mayor.

Unas dos docenas de compañías, japonesas en su mayoría, desarrollaron la técnica de TPD/PCL a mediados de los ochenta. A finales de ese decenio, IBM/Toshiba, Sharp, Hitachi y otras firmas obtenían imágenes de excelente calidad sobre pantallas de color de 25 centímetros de diagonal. Por primera vez, una pantalla plana podía competir con un tubo de rayos catódicos en contraste, luminosidad y saturación de color (o viveza). De hecho, quienes contemplan a la vez los dos tipos de pantallas suelen preferir la imagen nítida, sin distorsión y exenta de fluctuaciones que ofrece la TPD/PCL.

La pantalla de matriz activa está alcanzando ya los niveles de calidad de imagen impuestos por la pantalla de TRC, pero su coste es muy superior al de ésta. Los fabricantes irán ganando experiencia en todos esos campos donde ya es indispensable el empleo de pantallas planas. Se espera que hacia 1995 tengan un mercado de unos quinientos mil millones de pesetas. La producción a tal escala deberá reducir los costes por unidad, hasta el punto de que las pantallas planas sean competitivas con los TRC en televisores, ordenadores personales y otros artículos de uso común. A finales de esta década, los ingresos procedentes de la venta de pantallas planas deberían superar los generados por las TRC.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FLAT PANEL DISPLAYS USING AMORPHOUS AND MONOCRYSTALLINE SEMICONDUCTOR DEVICES. K. Suzuki en *Amorphous and Microcrystalline Semiconductor Devices: Optoelectronic Devices*. Dirigido por Jerzy Kanicki. Artech House, Boston, 1991.

THIN-FILM-TRANSISTOR/LIQUID CRYSTAL DISPLAY TECHNOLOGY: AN INTRODUCTION. W. E. Howard en *IBM Journal of Research and Development*, vol. 36, n.º 1, págs 3-10, enero de 1992.

Identificación de sus patrones por las avispas parásitas

Las avispas no se limitan a reconocer los olores procedentes de las orugas que son sus patrones; aprenden, también, a identificar los compuestos químicos que emiten las plantas devoradas por estas últimas

James H. Tumlinson, W. Joe Lewis y Louise E. M. Vet

El juego del escondite es algo más que un mero entretenimiento infantil. Los animales también "juegan" al escondite, y para la mayoría de ellos lo que está en prenda es la vida o la muerte. Las avispas parásitas buscan ahí la propagación. Las hembras preparadas para poner huevos deben inyectarlos en un patrón, con frecuencia la oruga de una polilla o de una mariposa. Queda ésta paralizada, mientras los huevos depositados se desarrollan y originan larvas de avispas. Las larvas se alimentan del patrón, hasta consumirlo, y forman capullos sobre los restos del patrón o en su vecindad. Y pupan. Huelga decirlo, a la oruga le interesa permanecer escondida bajo las hojas. No parece que la discreción pueda constituirle ningún problema en un campo de cultivo grande y frondoso.

¿Cómo detectan, pues, las avispas a sus víctimas en un medio enmarañado, escondidas o camufladas éstas? No parece que baste, por sí sola, la búsqueda aleatoria para conseguir un objetivo que les es literalmente vital. De los estudios de campo se infiere que una avispa podría pasarse toda su vida buscando un solo insecto patrón si hubiera de encontrarlo por azar. Hemos dedicado los últimos 10 años a la caza de una respuesta. Creemos tenerla ya. Más aún, los principios básicos que hemos descubierto se aplican a otros tipos de avispas parásitas, incluidas las que parasitan huevos u otros estadios de desarrollo de los insectos.

En breve: sostenemos que las avispas se guían en su orientación por compuestos volátiles que perciben a bastante distancia del foco emisor. Las sustancias químicas a que nos referimos proceden de las heces de las orugas y, lo que quizás es más sorprendente, de las plantas que les sirven de alimento. Nuestra pesquisa nos llevó hasta dos dominios de la etología apenas hollados: la capacidad de aprender de las avispas y la interacción entre éstas y las plantas.

Por lo que respecta al primer punto, las avispas descifran muchas señales, indirectas y cambiantes, que indican la localización de los patrones; semejante capacidad refleja un nivel de refinamiento insospechado en tales insectos. En lo concerniente al segundo, la planta atacada por una oruga emite señales que las avispas detectan. La agricultura podría sacarle partido a esa capacidad de aprendizaje de las avispas y apoyarse en la conjura avispa-planta para controlar las plagas de orugas en la naturaleza.

JAMES H. TUMLINSON, W. JOE LEWIS y LOUISE E. M. VET llevan más de diez años colaborando en el estudio del comportamiento alimentario de insectos parásitos de interés agrícola. Tumlinson y Lewis, formados en la Universidad estatal de Mississippi, se hallan adscritos al Servicio de Investigación Agraria, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Vet es profesora asociada de la Universidad Agrícola de Wageningen, en Holanda. Se doctoró en ecología animal por la de Leiden.

Cuanto hemos descubierto a propósito de las complejas interacciones entre parásitos, patrones y plantas arrancaba de la hipótesis según la cual ciertos olores específicos, procedentes del patrón, habrían de guiar a las avispas hacia sus víctimas. Fundábase esa idea de partida en determinados trabajos donde se mostraba que las avispas parásitas respondían a algunas señales químicas, ya identificadas y sintetizadas. Esos compuestos guiadores pertenecían a las kairomonas, una clase de mediadores químicos. Se trata de sustancias que proceden sobre todo de las secreciones orales y de las heces de la oruga y que actúan a distancias cortas, como olores de rastreo o estimulantes de búsqueda.

Pero las kairomonas no agotaban todas las posibilidades. Su carácter no volátil dificulta su difusión atmosférica; en consecuencia, no podían percibirse desde muy lejos. Pero si las avispas hubieran de fiar exclusivamente en señales de corta distancia procedentes de sus patrones para descubrir la presencia de éstos, su éxito apenas superaría el obtenido con la búsqueda al azar.

Así las cosas, el grupo de S. Bradleigh Vinson, de la Universidad A&M de Texas, descubrió una pista: las avispas parásitas eran también atraídas por compuestos químicos volátiles, detectables a varios metros de distancia y capaces de aportar la baliza que las avispas necesitaban. Las investigaciones realizadas en nuestro laboratorio de Wageningen corroboraron, sin ambigüedad, que las avispas podían servirse de sustancias químicas volátiles en la identificación de patrones; fue la primera prueba de la importancia del aprendizaje en la búsqueda del alimento.

Para ello, empleamos un olfatómetro de flujo de aire, esencialmente un contenedor cuadrado. El aparato proporcionaba hasta cuatro campos de olor distintos (procedente cada uno de una esquina) a una avispa situada en el centro. Según vimos, las avispas de la especie *Leptopilina clavipes* respondían al olor de hongos en descomposición, que tienen cierta probabilidad de albergar a su patrón, las larvas fungívoras de la mosca del vinagre, *Drosophila*. Demostramos que las avispas desarrollaban preferencias por olores procedentes de otras fuen-

tes, como fruta en fermentación, si se las criaba en patrones que habíanse alimentado así y habían puesto sus huevos en dichos patrones.

Los experimentos con el olfatómetro de flujo de aire mostraron que respondían a señales volátiles, pero no revelaban de qué modo las avispas se aprovechaban de los olores de la naturaleza. No volaban en el olfatómetro, y el aparato era demasiado pequeño para remedar las condiciones naturales.

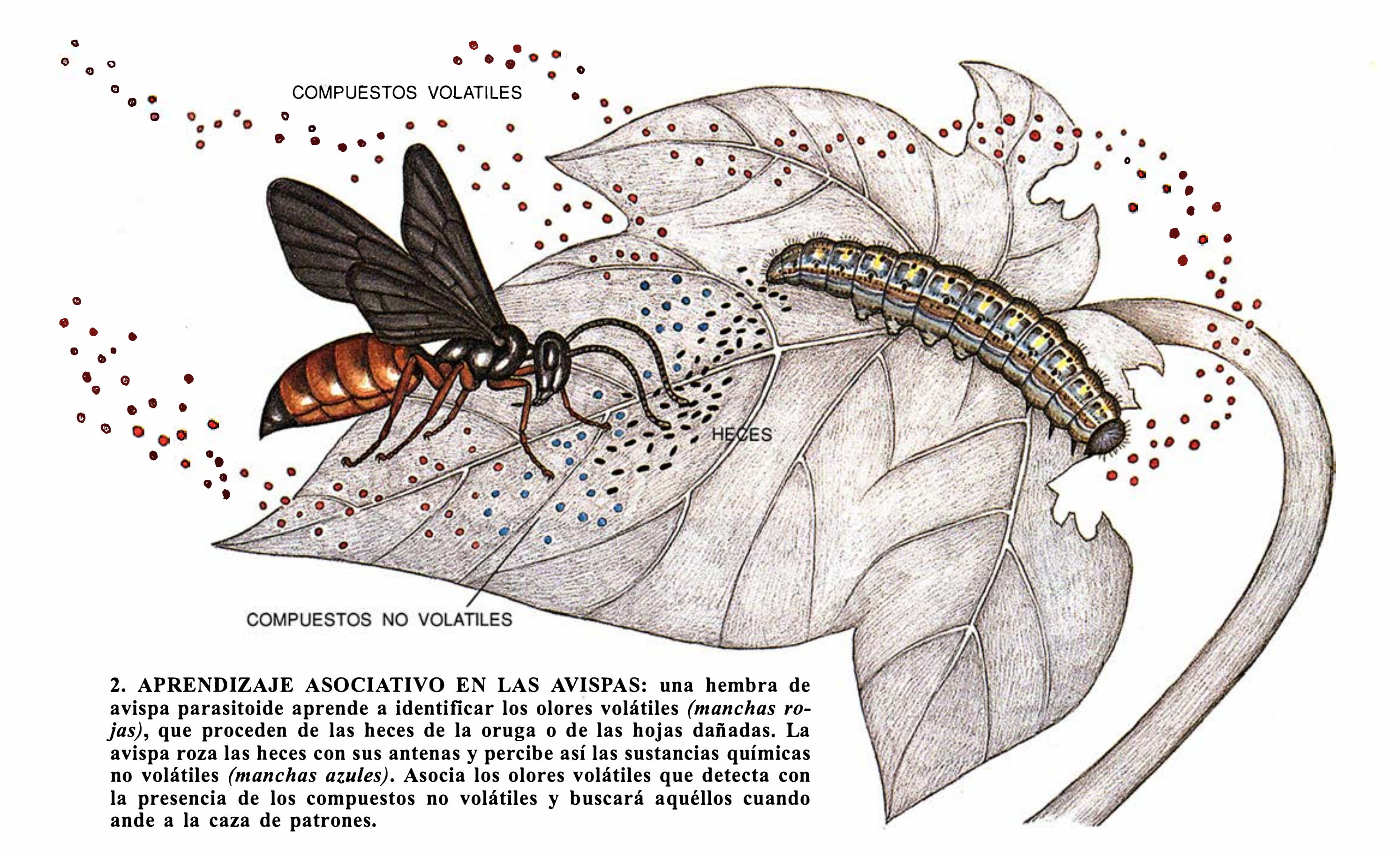
Decidimos, por tanto, emplear túneles de viento para estudiar las respuestas de las avispas en vuelo a las sustancias químicas volátiles. Los túneles vienen a ser unos conductos largos que aíslan el interior de olores extraños y de corrientes de aire. Se recurre a ellos para analizar las respuestas de polillas a las feromonas y otras sustancias estimulantes. Un pequeño ventilador hace circular el aroma desde un extremo del túnel hacia el otro; en un extremo se colocan las plantas infestadas de orugas y, en el otro, se sueltan las avispas. Dábamos por descontado que las avispas encontrarían a sus patrones volando contra el viento, en una de la plumas de olor que parten de las orugas.

Pero los resultados iniciales nos dejaron desconcertados. Las hembras de la avispa parásita *Microplitis croceipes* respondieron mal a los olores de sus patrones, larvas del taladro del maíz, que comían hojas de judías de vaca o caupíes. Yvonne Drost y Oliver Zanen, de nuestro laboratorio de Tifton, Georgia, descubrieron que sólo un 10 por ciento de las avispas hembra criadas en el laboratorio respondían a olores procedentes de las plantas infestadas de larvas.

Este curioso resultado obedecía al hecho siguiente: las avispas de la especie *M. croceipes* habían sido



1. HEMBRA DE AVISPA PARASITA en el acto de aguijonear a una oruga herbívora y de poner los huevos en su víctima. El mejor conocimiento del modo en que la avispa localiza a su patrón permitirá recurrir a ésta para controlar las plagas.



2. APRENDIZAJE ASOCIATIVO EN LAS AVISPAS: una hembra de avispa parasitoide aprende a identificar los olores volátiles *(manchas rojas)*, que proceden de las heces de la oruga o de las hojas dañadas. La avispa roza las heces con sus antenas y percibe así las sustancias químicas no volátiles *(manchas azules)*. Asocia los olores volátiles que detecta con la presencia de los compuestos no volátiles y buscará aquéllos cuando ande a la caza de patrones.

criadas en patrones mantenidos con una dieta de laboratorio (de judías comunes suplementada con vitaminas). Ni siquiera en sus estadios larvarios las avispas habían estado en contacto con patrones en condiciones naturales, con productos de los patrones o plantas de judías de vaca. Las hembras de avispas sólo respondieron a los olores del túnel de viento después de que las dejáramos entrar en contacto con las larvas de taladro del maíz.

Este resultado constituyó un punto de inflexión en nuestro trabajo sobre el comportamiento alimentario de las avispas. Nos hizo advertir la importancia de la experiencia en el aprovechamiento de los olores, mayor de lo que habíamos imaginado. No sólo eso: la experiencia no requería contacto físico directo con un patrón. Después de tocar con sus antenas las heces de una oruga durante unos 30 segundos, las avispas podían localizar posteriormente a las larvas.

Las pruebas subsiguientes en el túnel evidenciaron la atracción de las avispas hacia las heces de los patrones. Fred J. Eller, que trabaja en nuestro laboratorio de Gainesville, Florida, observó que el olor de las heces permitía a las avispas determinar la especie de planta en la que había comido el patrón; halló, asimismo, que las hembras familiarizadas con las heces de patrones que han comido una planta vuelan con más frecuencia hacia los olores procedentes de estas heces que a los olores de patrones que se alimentan de una planta distinta.

¿Qué se encerraba en las heces que atraía a las avispas? Lo lógico sería que fueran los compuestos volátiles. Pensábamos que las avispas poseerían una habilidad innata sintonizada con el olor de las heces del patrón. Para confirmar el supuesto, extrajimos con hexano los compuestos volátiles de las heces; el hexano es un solvente líquido derivado del petróleo. En pruebas en túneles de viento, los extractos volátiles atraían a las avispas con la misma fuerza que las plantas infestadas de patrones.

Pero una investigación más pormenorizada no tardó en plantearnos cierta dificultad: ensayamos con hembras que sólo habían trabado contacto con el extracto volátil y nunca habían estado expuestas a heces de oruga. Para sorpresa nuestra, estas hembras respondieron mal; para ser precisos, no lo hicieron mejor que las avispas que no habían tocado nada.

Decidimos examinar entonces los restantes componentes de las heces, no volátiles. Los separamos con agua y probamos para ver si atraían a las avispas. Las hembras se sentían levemente atraídas hacia el material de la solución acuosa; pero, después de tocar estos compuestos con sus antenas, las hembras respondían a los volátiles extraídos con hexano.

Estos resultados señalan, en su conjunto, que en los compuestos no volátiles, solubles en agua, reside un componente crucial, específico de cada tipo de patrón. Las avispas deben asociar las sustancias químicas volátiles con las no volátiles.

Para determinar de forma tajante que las avispas adquieren conocimiento de las sustancias químicas volátiles por asociación, experimentamos con olores nuevos. Las dejamos que olieran extracto de vainilla cuando rozaban la solución acuosa. Según lo esperado, volaron luego hacia el olor de vainilla; "pensaban" que había patrones cerca. Esta capacidad de relacionar diversos olores con sus patrones amplía muchísimo la gama de sustancias químicas que las avispas parásitas pueden emplear para localizar a sus presas.

Hans Alborn, de nuestro laboratorio de Gainesville, demostró que las sustancias químicas de la solución acuosa no guardaban relación con la dieta. Comprobó que los compuestos químicos que las avispas reconocían podían obtenerse de las heces de larvas del taladro del maíz criadas con dietas artificiales. La comida podía ser incluso papel de filtro. El hecho de que la sustancia química no volátil sea independiente del alimento del patrón contrasta mucho con lo

que ocurre con los compuestos volátiles, específicos de la dieta. Algunos proyectos de investigación en curso se han propuesto identificar el componente no volátil.

Aunque las señales químicas constituyen la fuente primaria de información que guía a las avispas parásitas, las formas, colores y entorno de la oruga desempeñan también su papel. Felix L. Wäckers, de nuestro laboratorio de Tifton, estudió el uso que *M. croceipes* hace de tales señales ópticas en un túnel de viento. Recurrió al olor para enseñarles a asociar una oruga con varias pautas de color, una coloración anarajanda uniforme o un patrón de cuadros blancos y negros, ligadas a las hojas de las plantas. Cuando se suprimió el olor, las avispas respondían sólo a las pautas cromáticas.

Wäckers demostró que las hembras empezaron en seguida a mostrar preferencias por determinadas combinaciones de olor y estímulos visuales. Olor y efecto óptico se reforzaban: la preferencia aprendida para las combinaciones era más fuerte que el olor o la señal visual por sí solos.

Esta sutil capacidad para aprender señales visuales y químicas, y usarlas de forma combinada, se convierte en un sistema poderoso de percepción y seguimiento de las presas. Con la información adquirida, localizan sin dificultad los sitios adecuados y concentran su búsqueda en las partes de la planta más provechosas.

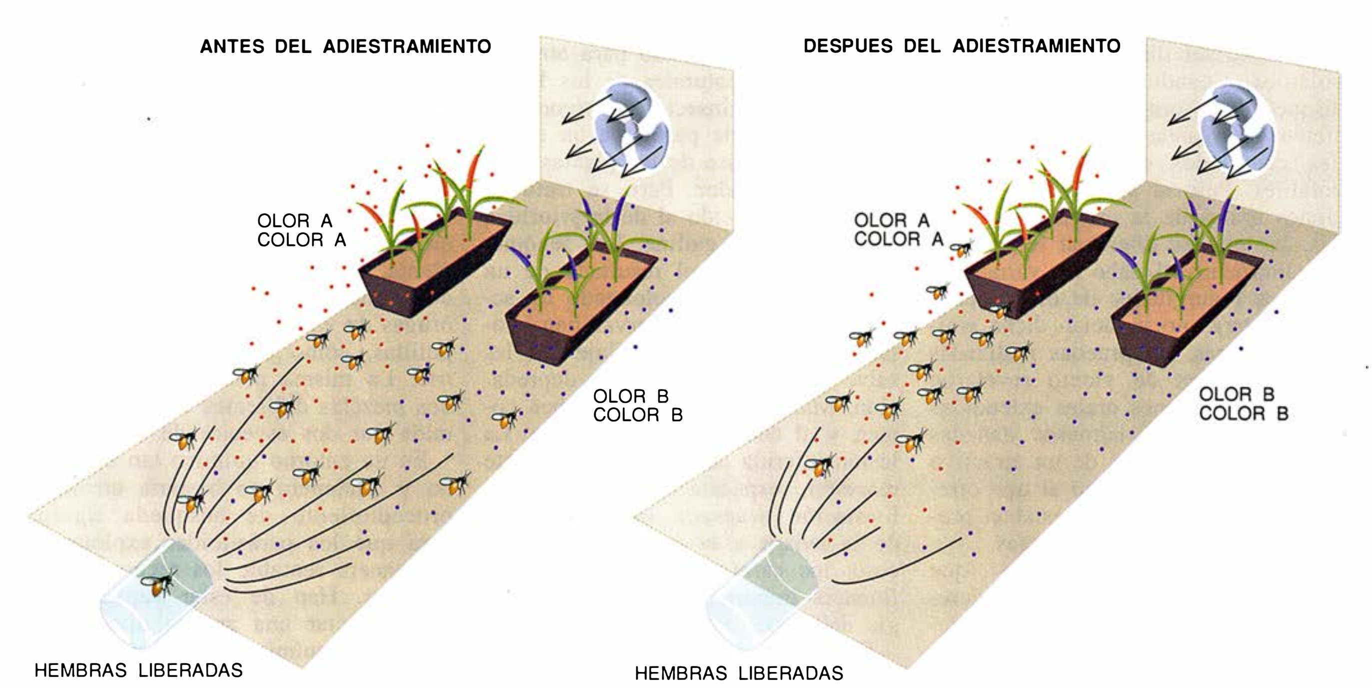
Durante la caza de la oruga, la planta no se comporta como un observador pasivo. La verdad es que su reacción ante el ataque que sufre por parte de aquélla deviene el elemento más sorprendente de este sistema depredador-presa. En respuesta al mordisqueo, las plantas sintetizan compuestos volátiles, procedentes de los tejidos dañados y de los intactos, que después liberan. Se trata, a buen seguro, de una estrategia de defensa contra los invasores: muchas de las sustancias volátiles desprendidas por plantas dañadas son tóxicas para los insectos. Pero no repelen a las avispas; antes bien, éstas se aprovechan de tales aromas para descubrir dónde se hallan sus patrones.

La primera prueba de que las plantas recibían la ayuda de enemigos naturales ante el ataque herbívoro llegó en 1988, cuando Marcel Dicke y Maurice W. Sabelis, colegas de uno de los autores (Vet) estudiaban ácaros depredadores que hacían presa sobre ácaros tetraníquidos, vegetarianos. Descubrieron que mientras los tetraníquidos herbívoros comían hojas de judía lima, la planta emitía una mezcla de sustancias volátiles que atraía a los ácaros depredadores. La mezcla es doblemente específica, del vegetal y del ácaro herbívoro que se alimenta de ella. Los ácaros depredadores pueden discernir estas diferencias y, por tanto, reconocer a su presa.

Las sustancias químicas volátiles liberadas por plantas infestadas de orugas aparecen, pues, como atractores poderosos de las avispas. La investigación acaba de mostrar que las avispas son más sensibles a dichos productos químicos que a los desprendidos de patrones y heces. Ted C. J. Turlings, de nuestro laboratorio de Gainesville y experto en *Cotesia marginiventris*, un parasitoide de larvas de polillas, encontró en pruebas en el túnel de viento que las plantas de maíz dañadas por los patrones constituían el foco principal de atractores volátiles. Si se eliminaban los patrones y sus productos, incluidas las heces, la atracción ejercida por las plantas disminuía sólo ligeramente. Ni los patrones ni las heces equiparaban la fuerza de atracción de las plantas solas.

Alguien podría sospechar que el olor de "hojas verdes", reminiscente de la hierba recién cortada, atrae a las avispas. Pero tales señales son intermitentes; se emiten sólo cuando la oruga mordisquea; terminada la pitanza, la sección dañada de la hoja deja de emitir el olor de hierba acabada de cortar.

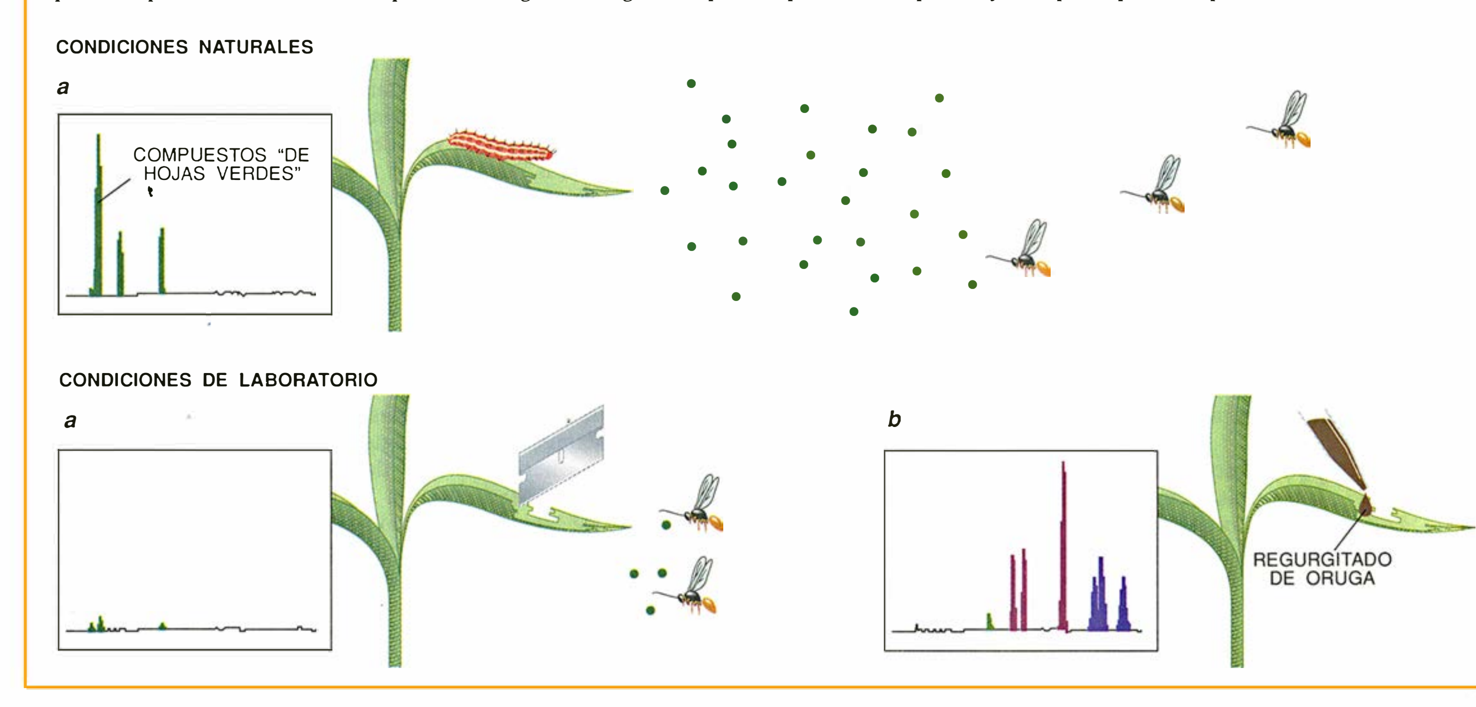
Sin embargo, análisis más detallados revelaron que las plantas producen un conjunto más consistente de atractores volátiles: terpenos y sesquiterpenos. Estos hidrocarburos se sintetizan varias horas después del ataque y persisten durante horas, quizá días. El retraso en formar los



3. TUNEL DE VIENTO que se emplea para demostrar que se puede adiestrar a las hembras de las avispas en la respuesta ante un olor y color determinados. Durante el período de aprendizaje *(izquierda)*, se presentan dos grupos de plantas, cada uno de ellos marcado con un aroma y color diferentes. A las avispas se les ofrecen premios consistentes en orugas sólo si vuelan al grupo etiquetado como "olor A" y "color A". Así adiestradas *(derecha)*, cuando a las avispas se les plantea la misma elección, vuelan inmediatamente hacia tal grupo de plantas, incluso en ausencia de orugas.

Señales de peligro emitidas por las plantas

Las plántulas de maíz atacadas por orugas del noctuido de la remolacha atraen a las avispas parásitas con la emisión de compuestos volátiles *(fila superior)*. Los compuestos químicos se identifican por cromatografía de gases (*picos*). Mientras la oruga se alimenta, la planta mordisqueada emite sustancias químicas "de hojas verdes" *(a)*, que atraen ligeramente a las avispas. Pero más tarde, la planta produce terpenos y sesquiterpenos, que llaman



terpenos y sesquiterpenos indica que la fisiología y la bioquímica de las plantas cambian activamente en respuesta al daño causado por los herbívoros. Se desconocen los mecanismos que subyacen a este cambio.

Se requiere la emisión de ciertas sustancias químicas por la oruga para que el vegetal libere los compuestos volátiles. Cuando imitamos el mordisqueo de la oruga con una hoja de afeitar, las plantas no emitieron grandes cantidades de los compuestos volátiles. Pero si aplicábamos secreciones orales de la oruga a las heridas, las plantas liberaban terpenos y sesquiterpenos al cabo de varias horas. Los regurgitados de oruga sobre hojas enteras no inducían dicha emisión. Además, las pruebas realizadas en los túneles de viento revelaron que las secreciones orales extendidas sobre hojas artificialmente dañadas dotaban a las plantas de un atractivo para las avispas idéntico al que ofrecían cuando las lesiones estaban producidas por las propias orugas.

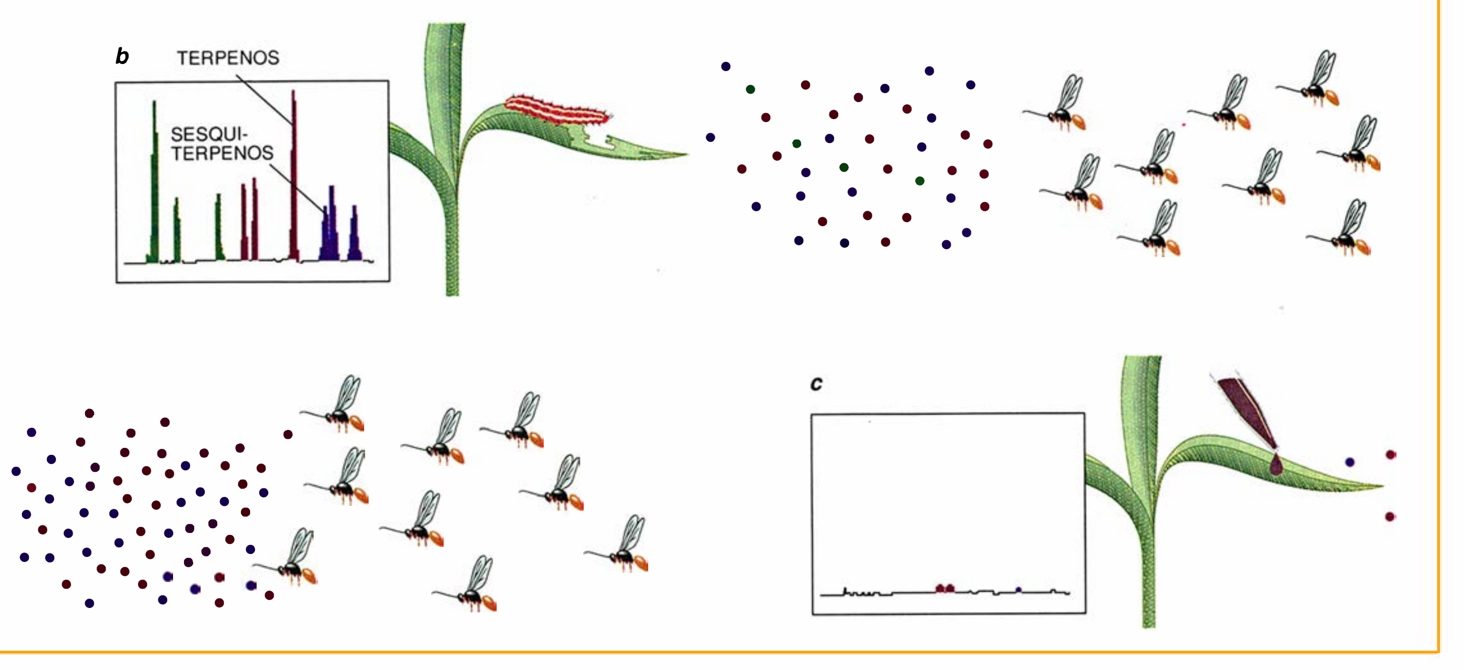
Turlings comprobó, a su vez, que la respuesta de la planta a las secreciones orales era sistémica; vale decir, toda la planta desprendía compuestos volátiles cuando una o más hojas sufrían el ataque de la oruga. Dicke se había encontrado ya con otro efecto similar, en el que hojas intactas de una planta mordisqueada por un ácaro tetraníquido atraían a los ácaros depredadores. Gracias a ese efecto sistémico, la planta atacada destaca por encima de sus vecinas.

La investigación en curso se propone aclarar si la liberación de sustancias volátiles por parte de la planta ha evolucionado para atraer a los enemigos naturales de los herbívoros o si los insectos carnívoros se limitan a sacarle partido a un mecanismo de defensa de las plantas contra su depredador. Pero se trata de un dilema parecido al de la prioridad del huevo o la gallina. Los fenómenos actuales son el resultado de un proceso evolutivo prolongado de acción y reacción. Las larvas han evolucionado hacia el camuflaje que les salve del parasitismo y la depredación. Mas, para sobrevivir, deben comer, y al comer dañan la planta. La lesión inferida induce la consiguiente reacción, respuesta que aporta la información necesaria para el ataque de la avispa a la oruga. En el proceso, los carnívoros ejercen una influencia importante sobre la estrategia defensiva del vegetal.

Este juego evolutivo del escondite nos lleva a otra pregunta. ¿Por qué deben aprender las avispas parásitas? La respuesta radica en el número increíblemente alto de sustancias químicas con las que las avispas han de habérselas. Las señales variarán bastante si los patrones se alimentan de diversas especies vegetales. Para parasitoides tales como *M. croceipes*, cuyas víctimas viven de plantas muy dispares, las especies involucradas emitirán señales completamente distintas. Por ejemplo, el algodón, el caupí y la soja producen una mezcla de sustancias químicas volátiles, única para cada una de estas especies, cuando son comidas por orugas del taladro del maíz. Además, la composición de las sustancias volátiles difiere cuando los patrones mordisquean partes distintas de la misma planta. El panorama se complica todavía más si un parasitoide ataca a orugas de varias especies distintas de polillas, como hace *C. marginiventris*. La misma planta puede liberar dos mezclas diferentes cuando es comida por dos especies de orugas.

En un entorno químico tan enredado y dinámico, no bastaría un solo procedimiento de búsqueda rígido para que los parasitoides explotaran de manera rentable los recursos disponibles. Han de estar capacitados para detectar una amplia diversidad de señales químicas de interés potencial y determinar su significado en el contexto que les rodea. Pueden encontrar, en un mismo sitio, diferentes especies de patrones o estadios de crecimiento de plantas de

poderosamente a las avispas (*b*). La planta continúa sintetizando estos compuestos incluso después de que la oruga haya dejado de comer. En el laboratorio (*fila inferior*), al simular las lesiones producidas por la oruga mediante una hoja de afeitar (*a*) se sintetizan pocos compuestos. Mas cuando se depositan sobre hojas lesionadas artificialmente las secreciones orales de las orugas, la planta produce terpenos y sesquiterpenos, aunque no compuestos de hojas verdes (*b*). Si se deposita regurgitado de oruga sobre una hoja intacta no se obtiene ninguna respuesta (*c*).



distinto grado de conveniencia y pueden tener que "decidir" si continúan buscando en una zona o si la abandonan para irse a otra. La probabilidad de sobrevivir con que cuentan sus descendientes dependerá del acierto de las avispas en el proceso de búsqueda del alimento. Cuando se consideran todos los factores que convergen en ese medio donde los parasitoides han de buscar, resulta evidente por qué el aprendizaje constituye un elemento esencial de la estrategia alimentaria de la avispa.

Ahora bien, el que las hembras necesiten experimentar y aprender el olor de sus patrones plantea una cuestión obvia. ¿Cómo descubren a sus primeros patrones las avispas que acaban de emerger de sus capullos, desarrollados en el exterior o cerca de la oruga? La respuesta, aunque se mueve todavía en el terreno teórico, goza de cierto respaldo observacional y permite pergeñar una conjetura razonable. Parece haber dos posibilidades.

En primer lugar, las avispas evidencian cierta preferencia innata hacia determinados olores. Por los trabajos realizados con parasitoides de las larvas de *Drosophila* sabemos que ciertos olores resultan más atractivos a las hembras inexpertas que los procedentes de orígenes distintos. Eller observó que las hembras de *M. croceipes* que no habían entablado contacto con patrones se sentían ligeramente atraídas hacia sustancias químicas volátiles procedentes de algunas plantas. Las avispas parecen tener una inclinación genética hacia olores de sustancias que han servido de fuente de alimento para los patrones.

De acuerdo con la segunda posibilidad, los compuestos de sus capullos adiestrarían, hasta cierto punto, a las avispas. Franck Hérard, que trabaja en nuestro laboratorio de Tifton con *Microplitis demolitor*, una especie australiana que ataca a las larvas del taladro del maíz, observó que las avispas criadas en patrones alimentados con plantas respondían bien en un túnel de viento a los olores de plantas infestadas de patrones. Pero esa respuesta se producía sólo si se había permitido que las avispas salieran de sus capullos de manera natural. Por el contrario, las avispas que habían emergido de capullos cortados artificialmente respondían mal a los olores de los patrones herbívoros. Su reacción mejoraba cuando podían andar sobre sus capullos y tocarlos con las antenas. Es indudable que los capullos contienen olores y otras sustancias de los patrones y de sus plantas alimento. Este condicionamiento inicial proporcionaría la "experiencia" que ayuda a las avispas a localizar su primer patrón.

Parece, en efecto, suficiente un nivel de capacidad innata y de contacto con el capullo para aleccionar a las avispas a responder al estímulo oloroso de plantas infestadas de patrones. Se ha visto que las avispas suelen tener dificultades en encontrar sus primeros patrones, lo que con frecuencia requiere de 20 a 30 minutos; su rendimiento mejoraba con cada éxito en los primeros encuentros. Las avispas descubrían ya a los patrones subsiguientes en menos de cinco minutos.

Aprovechando esa facilidad de aprendizaje y acierto en la respuesta a señales químicas, los investigadores han empezado a explorar las posibilidades de sacar partido de esas dotes de las avispas. Se proponen, en particular, mejorar, si pueden, la proclividad natural de las avispas parásitas a controlar las plagas de orugas. Un adiestramiento dirigido permitiría que las avispas "vigilaran" las plantas de interés para el hombre y que las protegieran frente a las orugas herbívoras.

El recurso a insectos beneficiosos para el control de las plagas no constituye ninguna novedad. Recuérdese el control biológico de la tristemente famosa cochinilla acanalada (*Icerya purchasi*), que estuvo a punto de acabar con los cítricos de California a finales del siglo pasado. La

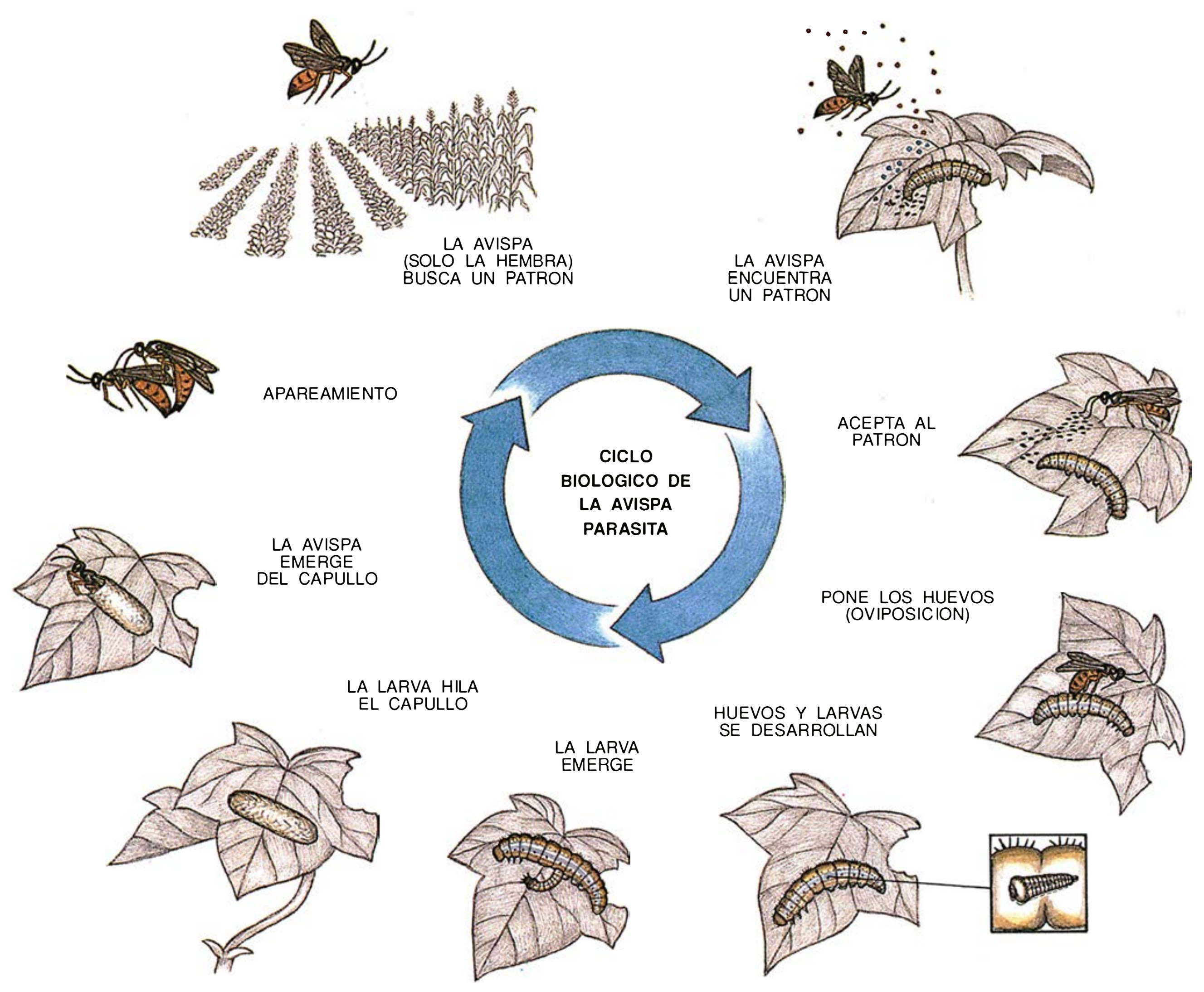
importación de la mariquita *Vedalia cardinalis*, un depredador procedente del territorio original de la plaga, Australia, salvó los bancales. Más recientemente, el control de plagas combina el uso de insectos beneficiosos con prácticas de gestión adecuadas, tales como la rotación de cultivos. Durante los últimos 20 años, este enfoque se ha convertido en el principal método en Europa para evitar las devastaciones de las moscas blancas y de otras plagas de los invernaderos. En los Países Bajos la superficie de invernaderos así protegidos aumentó desde 400 hectáreas en 1970 hasta 14.000 hectáreas en 1991. En este caso, el control biológico ha resultado ser más barato y fiable que el químico.

Pero el enorme potencial de estas armas naturales está todavía por explotar en su mayor parte, por la razón principal de que no hemos logrado desentrañar todavía el modo en que los insectos beneficiosos encuentran a sus presas. Con frecuencia, la fortuna del azar se apuntó el éxito del control biológico. Lo que significa que el control de la mayoría de las principales plagas de nuestros cultivos sigue centrado en el uso de plaguicidas sintéticos, a pesar de los problemas derivados del uso generalizado de compuestos tóxicos: contaminación ambiental, intoxicación alimentaria y desarrollo de mecanismos de resistencia por parte de las plagas.

Ciertos experimentos acaban de demostrar la intervención decisiva, en el control ecológico de las plagas, de las avispas parásitas adecuadamente adiestradas. Randy Martin y Daniel R. Papaj, colaboradores nuestros, han realizado sendos estudios de campo a pequeña escala donde se evidencia que el adiestramiento en el laboratorio mejora el éxito inicial de búsqueda de alimento de avispas soltadas en la naturaleza. Además, las avispas tienden a permanecer en el campo para el que fueron entrenadas. Una dificultad típica en ensayos de control biológico precedentes había sido la de mantener a los insectos beneficiosos en una parcela concreta.

Pero nos sentimos incapaces todavía de esbozar un guión eficaz sobre el desarrollo de un control fiable sustentado en avispas parásitas. Deberían satisfacerse, en nuestra opinión, dos condiciones antes de responsabilizar a las avispas del control de las plagas. En primer lugar, que sean atraídas a una zona y retenidas allí; en segundo, que mantengan un alto grado de rendimiento en la localización y parasitación de sus patrones.

Hay varias maneras posibles de cumplir esos objetivos. Las avispas aprenden muy pronto, por cuya ra-



4. CICLO BIOLOGICO de una avispa parásita; desde el huevo hasta la muerte del adulto dura unas cinco semanas. Tras localizar a un patrón, la avispa cargada de huevos confirmará su hallazgo rozando con sus antenas las heces de la oruga, e inyectará uno de sus huevos en ésta. Al cabo de una semana, el huevo se desarrolla en larva, que se alimenta de la oruga. Después de salir de su patrón, la larva teje un capullo alrededor de sí misma. Pupa y emerge adulto a los 10 días.

zón deberá ponerse sumo esmero en asegurarse de que los estímulos que aparecen durante el adiestramiento en el laboratorio reflejan con fidelidad los que hallarán una vez sueltas en el campo. Los artefactos creados en el laboratorio podrían conducir a una "programación" incorrecta de los parásitos, fenómeno que pudo haber contribuido al fracaso de dicho control biológico en el pasado. A este respecto, el grupo de Vinson descubrió que los individuos de *Bracon mellitor* (un parasitoide del gorgojo del algodón), criados en el laboratorio, buscaban material que contuviera parahidroxibenzoato de metilo. Esta sustancia, un agente antimicrobiano ausente en la naturaleza, se había añadido a la dieta empleada para criar a los patrones. Aileen R. Wardle y John H. Borden, de la Universidad Simon Fraser, tropezaron con otro problema de laboratorio similar: a las avispas adiestradas en orugas criadas artificialmente (en contenedores de plástico para huevos) les costaba identificar a los patrones.

Para mantener una respuesta eficiente a los estímulos volátiles, las avispas necesitan recibir premios seguros de orugas mientras están aprendiendo a encontrar su alimento. Estudios con *M. croceipes* y los parásitos de *Drosophila* sugieren que llegar a poner huevos es la forma más importante de refuerzo. Las avispas parecen "recordar" mejor los olores después de poner los huevos que si sólo hubieran estado en contacto con los productos del patrón. Resultados preliminares en la naturaleza sugieren que un tal sistema de recompensas puede ser un medio efectivo.

La mejora vegetal o la ingeniería genética pueden también desempeñar su papel en el control biológico. Las técnicas podrían producir cepas de plantas que generaran mayores cantidades de las señales de atracción.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SEMIOCHEMICALS AND LEARNING IN PARASITOIDS. L. M. Vet y A. W. Groenewold en *Journal of Chemical Ecology*, vol. 16, n.º 11, págs. 3119-3135, 1990

EVOLUTIONARY THEORY AND HOST AND PARASITOID INTERACTIONS. P. W. Price en *Biological Control*, vol. 1, n.º 2, págs. 83-93, 1991.

LEARNING OF HOST-FINDING CUES BY HYMENOPTEROUS PARASITOIDS. T. J. Turlings, Felix L. Wäckers, Louise E. M. Vet, W. Joseph Lewis y James H. Tumlinson en *Insect Learning: Ecological and Evolutionary Perspectives*. Dirigido por Daniel R. Papaj y Alcinda C. Lewis. Chapman and Hall, 1992.

Las lámparas de la Edad de Hielo

La humanidad aprendió a controlar el fuego hace 500.000 años. Una innovación no menos importante ocurrió hace sólo 40.000: unas lámparas portátiles en las que se quemaba grasa animal

Sophie A. de Beaune y Randall White

El uso controlado del fuego, un hito en la historia de la humanidad, se consiguió hace medio millón de años. Aunque los arqueólogos y los antropólogos insisten en su importancia para la cocción de los alimentos, la procura de calor y la protección frente a las fieras, la luz que lo acompaña fue también un precioso recurso que posibilitó la extensión de la actividad humana a horas y lugares oscuros por naturaleza. La invención de lámparas de piedra donde se quemaba grasa en la Europa de la Edad de Hielo, hace unos 40.000 años, ofreció los primeros medios eficaces y portátiles de explotar esta virtualidad del fuego. La aparición de las lámparas coincide con grandes cambios culturales: la emergencia del arte, el adorno personal y complejos sistemas de armas.

Se han adelantado muchas hipótesis sobre el funcionamiento de las lámparas de la Edad de Hielo, pero nadie había emprendido su estudio sistemático. Una de nosotros (de Beaune) decidió examinar esas lámparas y clasificarlas por tipos. Así, construimos réplicas de las lámparas de piedra y las hicimos funcionar para ir analizando su eficacia como fuentes de luz y conocer a fondo su diseño, fabricación y uso.

El primer objeto identificado como una lámpara de la Edad de Hielo se descubrió en 1902, el año en que arqueólogos y prehistoriadores autentificaron el arte rupestre de la cueva francesa de La Mouthe. Los arqueólogos habían ya supuesto que la realización de pinturas y grabados en cavernas situadas a centenares de metros por debajo de la superficie del suelo debió requerir alguna fuente de luz artificial. Mientras exploraban La Mouthe hallaron una prueba que corroboraba su supuesto: una lámpara de piedra arenisca esmeradamente labrada y muy requemada, en cuyo reverso había grabada la figura de un íbice.

Desde entonces se han hallado en las excavaciones centenares de objetos con ahuecamientos más o menos trabajados, y se los ha agrupado, un tanto indiscriminadamente, en la categoría de lámparas. Que sepamos, hay 547 artefactos registrados como tales. En seguida se nos hizo obvio que no bastan el tamaño y la forma de un objeto para tomarlo por una lámpara y no por otras cosas similares (piedras de amolar, por ejemplo): las lámparas no por fuerza han de tener una depresión a modo de cuenco o receptáculo, pues muchas lajas lisas presentan trazas notorias de combustión local, que en ese y en otros casos proporcionan la única prueba indiscutible de que el objeto sirvió de lámpara.

De las 547 lámparas putativas, estaba claro que 245 habían servido para otros fines, y no era seguro que los otros 302 objetos hubiesen sido empleados como lámparas. Dividimos, pues, esta muestra (285 de cuyos componentes procedían de sitios conocidos) en dos categorías. Consideramos que 169 de las piezas eran cierta, probable o posiblemente lámparas. Las otras 133 las clasificamos entre las dudosas o de ninguna utilidad para el estudio. Las marcas dejadas por la quema del combustible y de la mecha tienden a desaparecer con el transcurso del tiempo, así que las lámparas más antiguas serían las más expuestas a que se las catalogase entre las dudosas. Las que aquí admitimos

SOPHIE A. DE BEAUNE y RANDALL WHITE se han especializado en la cultura y técnica de la Edad de Hielo. De Beaune, profesora de antropología física y experta en artefactos del Paleolítico, trabaja en el Centro Nacional para la Investigación Científica de París. White enseña antropología en la Universidad de Nueva York. De Beaune aporta aquí los datos nuevos, que White sitúa en un más amplio contexto científico.



1. LAMPARA CON MANGO TALLADO, de una antigüedad de 17.500 años. Se trata de una de las más elaboradas de cuantas usaron los humanos que durante el Paleolítico vivieron en lo que hoy es Francia. Se fabricó raspando y puliendo un trozo de piedra arenisca. En su parte cóncava se ponía el combustible — grasa animal— y una mecha; el largo mango impedía que se calentase el extremo. Las incisiones que se aprecian en el mango son semejantes a algunas de las figuras pintadas en la cueva de Lascaux, donde fue encontrada.

como auténticas pertenecen al Paleolítico Superior, siendo datables todas ellas entre los 40.000 y los 11.000 años de antigüedad.

Las 285 lámparas de origen conocido provenían de 105 yacimientos arqueológicos, la mayoría de ellos del sudoeste de Francia. La cuenca de Aquitania ha suministrado el 60 por ciento de las lámparas, la región pirenaica el 15 por ciento. Son bastantes menos las encontradas en otras zonas de Francia y sumamente raras las que proceden de otros países —España, Alemania y Checoslovaquia—. Aunque esta distribución de los hallazgos se puede explicar en parte por la mayor intensidad de las búsquedas y el mayor número de yacimientos existentes en el sudoeste francés, no parece sino que las culturas productoras de lámparas sólo se hubiesen dado dentro de los límites de una determinada región europea.

Una gran mayoría de las lámparas pétreas que conocemos son de piedra caliza o arenisca, que abundan mucho. La piedra caliza ofrece la ventaja de que suele darse en la naturaleza en forma de pequeñas lajas que requieren poca alteración. Además, la caliza es mala conductora del calor, con lo que las lámparas no se calientan tanto que puedan quemarle los dedos al usuario. La piedra arenisca, mejor conductora del calor, determina que las lámparas se calienten demasiado como para que se las pueda sostener en la mano al poco rato de haber sido encendidas; las gentes del Paleolítico solucionaron este problema tallándoles mangos o agarraderas.

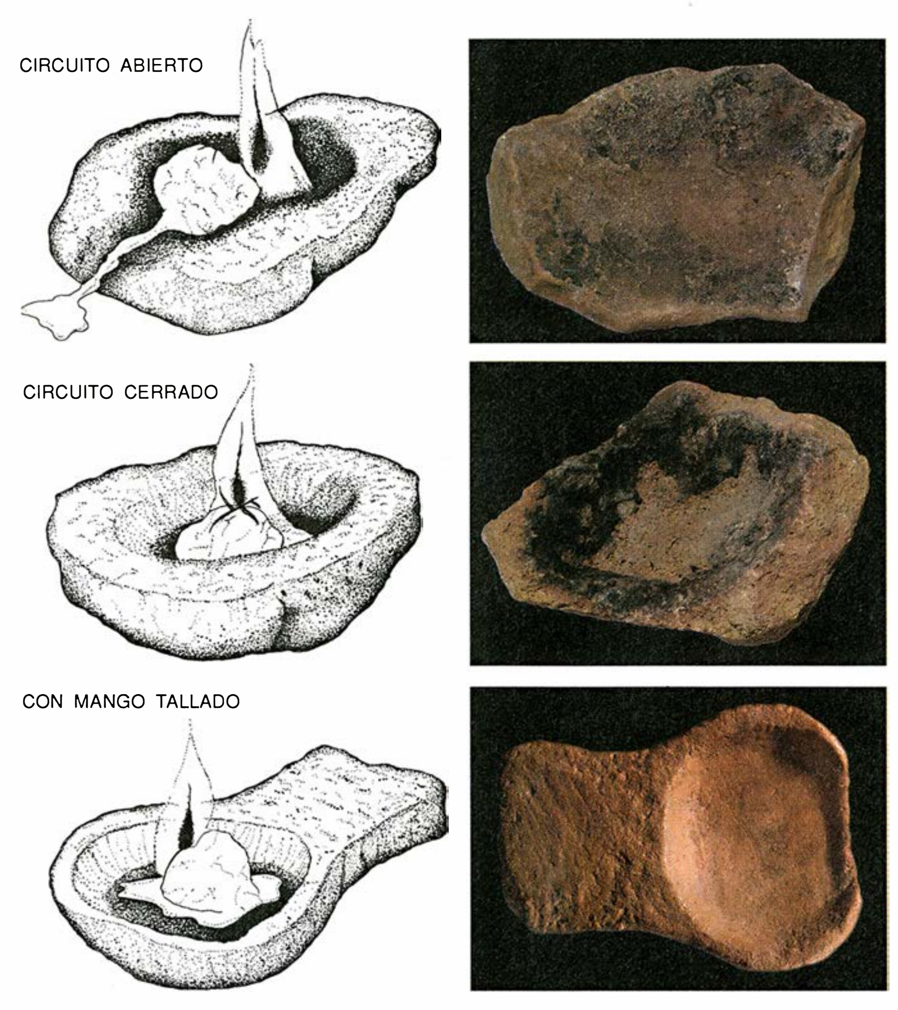
Nuestros experimentos indican que el tamaño y la forma del hueco son los factores primordiales del buen funcionamiento de una lámpara de piedra. En razón de la forma de la concavidad dividimos las 302 lámparas del Paleolítico Superior en tres tipos principales: lámparas de circuito abierto, de circuito cerrado solo y de circuito cerrado con mangos tallados.

Las de circuito abierto, las lámparas más sencillas, constan de pequeñas lajas del todo planas o ligeramente cóncavas; las hay también de lajas algo mayores que tienen cavidades naturales abiertas a un lado, de modo que pueda irse escurriendo el combustible excedente a medida que la grasa se derrite. Algunas miden hasta 20 centímetros de ancho. Dado que las lámparas de circuito abierto no muestran señales advertibles de labra o incisión alguna, es posible que gran número de ellas no fueran reconocidas en las excavaciones premodernas. Por eso, es posible que las lámparas de circuito abierto se hallen infrarrepresentadas en el catálogo.

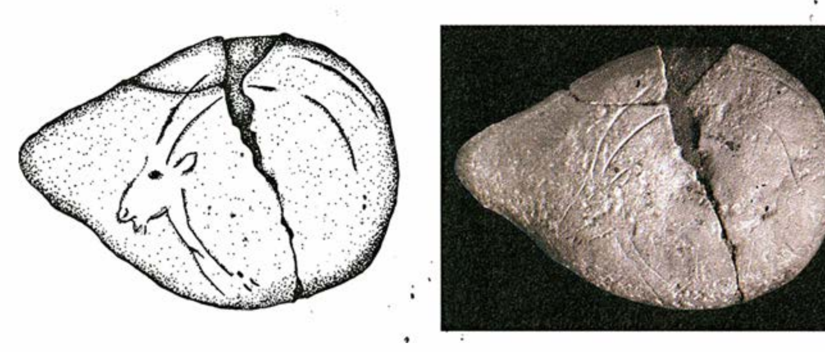
Una lancha cualquiera de piedra valdrá como lámpara de circuito abierto, tan poco es el esfuerzo exigido para fabricarse una. Pero consumen, en contrapartida, mucho combustible. Debieron de ser meros recursos para salir del paso, desechables. Como el estudio de los modernos inuit enseña, hay grupos humanos que, aun siendo capaces de fabricar lámparas complejas, queman grasa sobre una laja pétrea cuando nada más tienen a mano.

Las lámparas con una concavidad en circuito cerrado constituyen la variedad común. Se las halla en todas las regiones, en todos los períodos y en todos los tipos de yacimiento en los que se han recuperado lámparas. Tienen unas depresiones circulares u





2. TRES TIPOS PRINCIPALES de diseños de lámparas: las de circuito abierto (*arriba*) son lajas de piedra apenas alteradas; cuando la lámpara está encendida, la grasa derretida se va escurriendo por las grietas naturales de la piedra. Las lámparas de circuito cerrado (*centro*) tienen oquedades excavadas para el combustible y la mecha. Las de circuito cerrado y mango esculpido (*abajo*) tienen también una concavidad que sirve de cámara de combustión, pero presentan un acabado más fino y cuentan con unas prolongaciones que facilitan su manejo. Las marcas de la quema indican que la mecha se colocaba en la parte más distante del mango.



3. LAS INCISIONES DECORATIVAS no son raras en las partes laterales o en el envés de las lámparas de circuito cerrado. Esta representación de un íbice adorna una lámpara manual encontrada en La Mouthe, en 1902, que fue el primer objeto identificado explícitamente como una lámpara.

ovales que retienen el combustible derretido. Hueco y exterior pueden ser naturales, retocados o del todo artificiales y labrados. Son de piedra caliza, del tamaño de un puño o poco más grandes. La concavidad presenta un borde inclinado apto para retener el líquido cuando se coloca el artilugio sobre una superficie horizontal. Suelen medir unos cuantos centímetros de diámetro por 15 o 20 milímetros de profundidad. Las más capaces pueden contener unos 10 centímetros cúbicos de líquido.

Las lámparas de circuito cerrado de la Edad de Hielo se parecen a las que hasta hace poco empleaban algunos pueblos inuit (los karibú, los netsilik y los aleut) que, como disponían de madera, no dependían de las lámparas para calentarse. Los inuit que vivían al norte de los límites de la vegetación arbórea, donde la madera era escasa, solían fabricarse grandes lámparas con bloques de esteatita de hasta un metro de diámetro. Esas lámparas gigantes (u hornos) cumplían funciones que desempeñan en otros sitios los fogones y cocinas, entre ellas las de secar la ropa, cocinar y dar calor a toda la estancia. Puede que haya relaciones directas entre la calidad y abundancia de la leña conseguible en el lugar, la presencia de fuegos hogareños y la forma de las lámparas de un yacimiento.

Las lámparas más complicadas son las que hemos llamado de circuito cerrado con mango tallado. Las 30 de nuestra muestra que tienen tales características fueron configuradas, pulidas y bien acabadas enteramente por abrasión. Cada una tiene un mango esmeradamente labrado; 11 de ellas están decoradas con grabados incisos. En el registro arqueológico constan estas lámparas como algo posteriores a las otras. Las primeras lámparas con mango tallado pertenecieron a la cultura Solutrense (de 18.000 a 22.000 años atrás) o a la del Magdaleniense Inferior (de 15.000 a 18.000 años de antigüedad). Abundan en el Magdaleniense Medio y en el Superior (de los 15.000 a los 11.000 años). La mayoría de las lámparas con mango tallado han sido encontradas en el departamento de Dordoña. Frecuentes en abrigos rocosos, se las halla también en cuevas y a campo abierto.

El elegante diseño, así como la rareza y la limitada distribución espaciotemporal de las lámparas con mango esculpido quizás impliquen que sirvieran primordialmente para fines ceremoniales. Un ejemplar conocido procedente de Lascaux, al que se le han calculado 17.500 años de antigüedad, fue encontrado en el suelo de la cueva, al fondo de un pozo de paredes verticales, junto al dibujo de un cazador que se enfrenta a un bisonte herido. Esta lámpara fue hallada por el abate Glory, quien sugirió que tales lámparas se habrían utilizado para quemar varitas aromáticas. Sin embargo, no se han hecho aún todos los análisis químicos que serían menester para verificar la hipótesis. Los otros tipos de lámparas de

piedra es probable que se limitasen a alumbrar.

La forma de lámpara que predomina en nuestro muestrario es, precisamente, la más eficiente de todas, según demuestran nuestros experimentos: de circuito cerrado, con un hueco oval o circular cuyas paredes forman suave declive. Con sólo inclinar un poco la lámpara se la vacía fácilmente lo bastante como para que el pabilo encendido no se anegue en la grasa derretida, sin que sea necesario desalojar la mecha. Hay otro modo de vaciar el recipiente aun sin tener que inclinar la lámpara: tallando una muesca en el borde del receptáculo. El ochenta por ciento de las lámparas paleolíticas estudiadas por nosotros son del tipo de las que han de ser inclinadas.

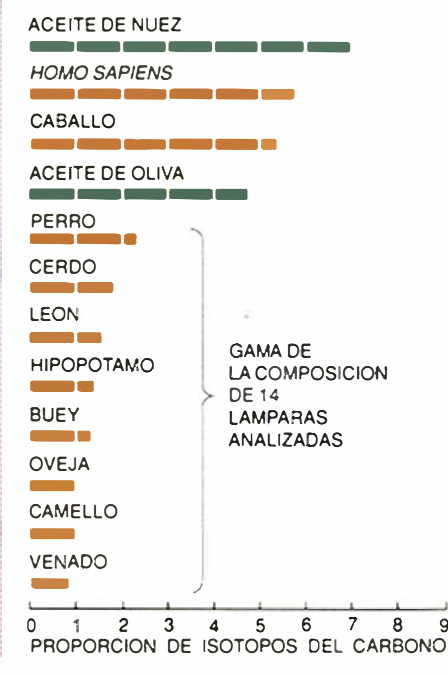
A tenor de nuestros ensayos, las mejores grasas para lámparas eran las que se funden deprisa y a baja temperatura, con poco tejido adiposo. Guy L. Bourgeois, de la Universidad de Burdeos, y de Beaune analizaron los restos de varias lámparas paleolíticas con el fin de identificar las sustancias que contenían. Por medio de la cromatografía de fases del vapor y la espectrometría de masas midieron las proporciones de isótopos del carbono que había en los ácidos grasos de los residuos: eran similares a las de las grasas animales extraídas de grandes herbívoros (bóvidos, cerdos y caballos). No disponemos de muestras de grasas de los animales que vivían a finales del Pleistoceno. No obstante, las proporciones de isótopos del carbono que se han observado son totalmente distintas de las que se encuentran en las grasas vegetales, lo que demuestra que, como se suponía, fueron los animales la fuente de combustible para las lámparas de la Edad de Hielo.

Nuestras investigaciones nos proporcionaron también nueva información acerca de los materiales de que se hacían las mechas. Una buena mecha ha de poder atraer por acción capilar la grasa derretida y conducirla hasta el extremo del pabilo para que arda allí sin consumirse demasiado aprisa. De las mechas que fuimos poniendo a prueba las que mejor funcionaron fueron las de liquen (empleadas, como se sabe, por los modernos inuit), las de musgo y, después, las de enebro. Fritz H. Schweingrüber, del Instituto Federal para la Investigación del Bosque, la Nieve y el Paisaje de Suiza, analizó varios residuos de lámparas, y detectó remanentes de coníferas, cupresáceas y diversos arbustos, así como otros no leñosos, posiblemente liquen o musgo. A tenor de nuestros ensayos, las mechas de cupresáceas nunca son consumidas del todo por la llama, así que pueden conservarse mejor que las mechas compuestas con materiales de otros vegetales.

Los rastros que de su utilización iban quedando en nuestras lámparas experimentales nos permitían interpretar con confianza los indicios observados en las paleolíticas. Esas señales de uso son, en líneas generales, de tres tipos: ligeras acumulaciones de hollín, depósitos de carbón vegetal y enrojecimiento del pedrusco mismo (proceso de "rubefacción"). En el 80 por ciento del total de lámparas observadas, el hollín y los depósitos de carbón están situados dentro o sobre el borde del receptáculo para el combustible, donde se supondría que se apoyó la mecha. El ennegrecimiento, en algunos casos, de las partes laterales o del envés de la lámpara lo pueden producir las partículas de hollín que arrastra consigo la grasa derretida al rebosar en forma de churretes. Los depósitos de carbón vegetal son un resultado de la carbonización de la mecha o de la alteración calórica, o calcinación, del tejido adiposo.

El enrojecimiento térmico aparece en las partes laterales y en el envés de las lámparas, aunque lo habitual es hallarlo en el interior de la cámara de combustible o sobre el borde de la misma (67,5 por ciento de los casos). La experiencia con réplicas modernas indica que el enrojecimiento advino cuando la grasa caliente y derretida se derramó por el lado y llegó hasta el reverso de la





4. LAMPARA EXPERIMENTAL DE CIRCUITO CERRADO (*izquierda*). Pone de manifiesto el empleo de tales objetos en el Paleolítico. Una porción de grasa hace de combustible; como mecha sirven trocitos de corteza de árbol, líquenes o musgo. La grasa derretida se recoge en un vaciado del pedrusco y hay que ir vertiéndola de cuando en cuando. El análisis químico de los residuos hallados en lámparas de la Edad de Hielo revela la presencia de residuos cuya composición recuerda la de la grasa de animales que eran corrientes en la Francia del Paleolítico (*derecha*). No se empleaban grasas vegetales.

lámpara, mientras estaba vaciándose o cuando rebosó por sí sola. Evidentemente, el enrojecimiento térmico puede ocurrir tras sólo unas pocas utilizaciones, por lo que es un buen indicador para averiguar qué artefactos se emplearon como lámparas.

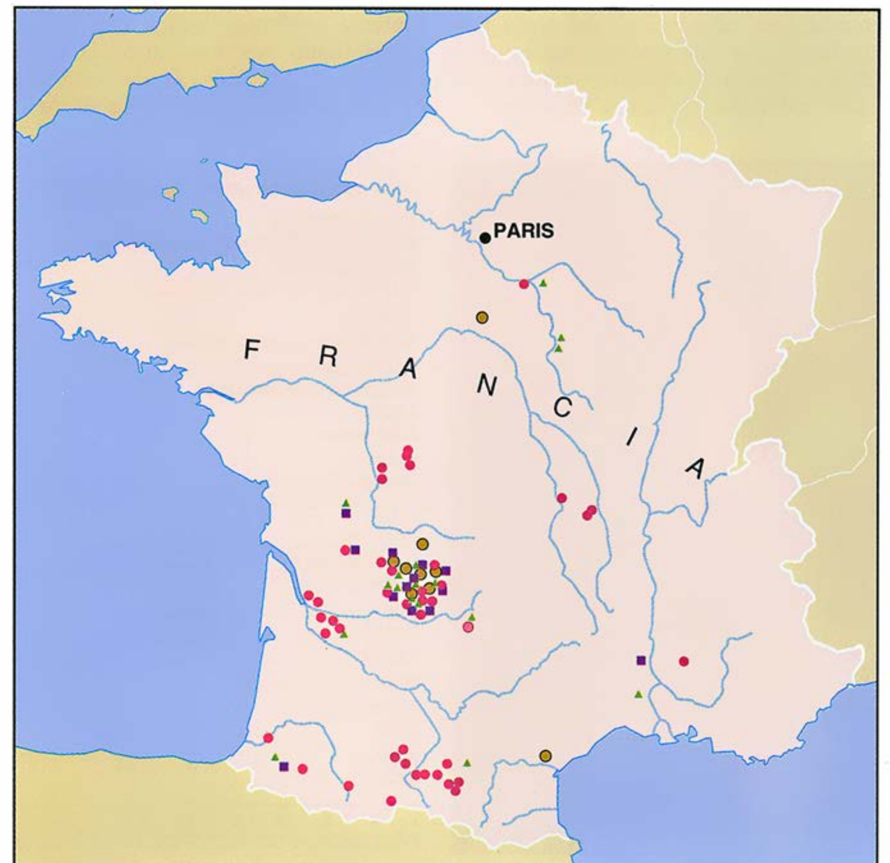
La repetida reutilización de una lámpara deja rastros muy perceptibles. Si una lámpara de circuito abierto o de circuito cerrado es encendida en varias ocasiones, la colocación de la grasa y de la mecha tiende a cambiar de una vez a otra. Como para estas sencillas lámparas no hay ninguna orientación privilegiada, con el tiempo cuenco y superficie se ennegrecen o enrojecen. En las lámparas de circuito cerrado esmeradamente trabajadas y dotadas de mango son muy diferentes las señales que deja el uso. Como se las ase siempre por la misma parte —por el mango— cada vez que se las enciende, el hollín se va depositando sólo en una zona de la cavidad, en la opuesta al mango.

Las lámparas de circuito abierto y las de mero circuito cerrado es probable que sólo fuesen encendidas unas pocas veces antes de su abandono. De simple factura, carece de sentido llevárselas de un sitio a otro; en apenas media hora hicimos nosotros una bastante aceptable.

Para evaluar la eficacia de las lámparas quemadoras de grasa del Paleolítico hay que saber cuánta luz podrían proporcionar. De Beaune lo investigó midiendo la luminosidad de réplicas modernas en los laboratorios de metrología de la casa Kodak-Pathé. Las copias experimentales dieron una luz notoriamente inferior en cantidad, intensidad y luminiscencia a la de una vela ordinaria, pero suficiente para guiar a una persona por el interior de una caverna o para iluminar un trabajo delicado junto al que se pusiesen las lámparas —suponiendo, naturalmente, que la agudeza visual de la gente del Paleolítico fuese la misma que la nuestra—.

Parece, pues, que los creadores de las pinturas rupestres jamás pudieron ver éstas como aparecen en las modernas fotografías. La percepción humana del color se distorsiona cuando los niveles lumínicos son inferiores a 150 lux (1000 lux es el típico de una oficina bien iluminada). Es dudoso que los creadores del arte rupestre trabajaran en condiciones de tamaña luminosidad. Para conseguir una percepción plena y exacta de esas imágenes plasmadas en un desigual panel cavernoso de cinco metros de longitud tendrían que haber instalado por lo menos 150 de sus lámparas, poniendo cada una a 50 centímetros de la pared de la cueva. También podrían haberse procurado una luz suplementaria mediante antorchas, pero son escasos los rastros de teas descubiertos en cuevas profundas. Por otra parte, la ausencia o escasez de lámparas en las galerías de cuevas tan vastas como las de Rouffignac, Niaux y Les Trois Frères implica que el pintor tuvo acceso a algunas otras fuentes de luz.

Hoy día, cuando se contemplan las pinturas rupestres de Francia y de España, la luz artificial produce unas impresiones distintas de las que debieron de experimentar los visitantes prehistóricos. La luz eléctrica de la cueva de Font de Gaume proporciona un nivel constante de iluminación de unos 20 a 40 lux a lo largo de todo un panel de pinturas. Para alcanzar el nivel de los 20 lux habría que situar muy calculadamente de diez a 15 lámparas de piedra. Una persona que portase nada más que una lámpara sólo podría ver pequeñas porciones del muro de la cueva, y sacaría una impresión muy diferente del arte rupestre. La débil iluminación producida por las vacilantes llamas de las lámparas quizá fuese parte del efecto deseado al con-



5. LOS HALLAZGOS DE LAMPARAS de la edad de hielo han tenido lugar sobre todo en el sudoeste de Francia (*izquierda*). Aparecen en todos los niveles del Paleolítico Superior (40.000 a 11.000 años de antigüedad); la mayoría de ellas proceden de períodos más tardíos. Sorprendentemente, la mayoría de las lámparas no han sido recuperadas en el interior de profundas cuevas, sino en excavaciones a cielo abierto o al pie de abrigos rocosos.

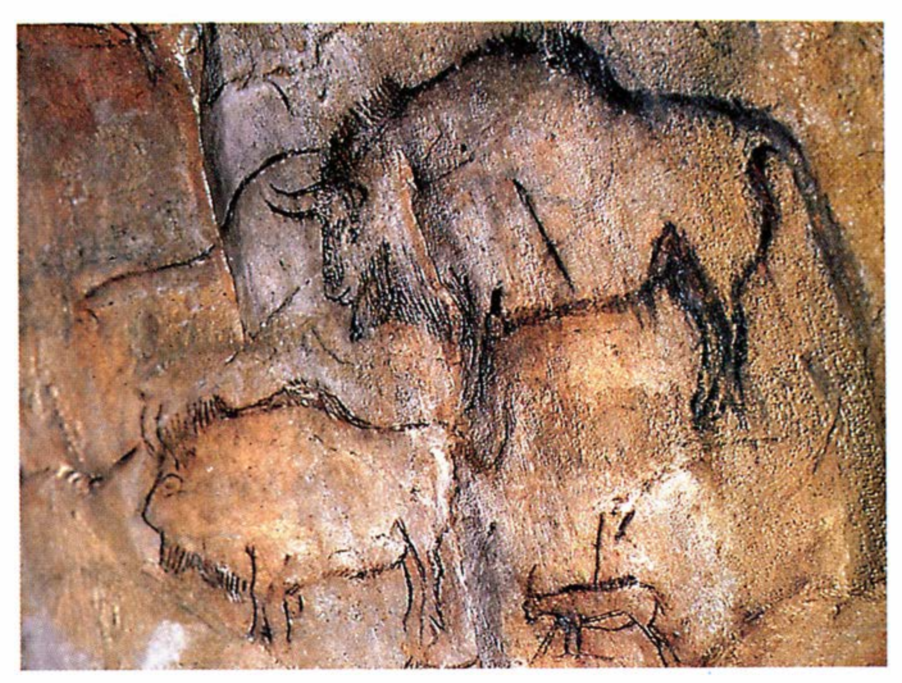
templar el arte en el profundo seno de una caverna. La ilusión del repentino materializarse de unos animales que surgen de la oscuridad es muy poderosa, y algunas de las figuras rupestres resultan aún más convincentes si no se las puede ver demasiado bien.

Por descontado que se emplearía lámparas quemadoras de grasa para realizar muchas tareas distintas de las de crear o contemplar pinturas rupestres. Se encuentran en tanta abundancia por todos los yacimientos prehistóricos del sudoeste francés, que deben de haber sido un utensilio muy común de la vida diaria. Solamente alrededor de un 30 por ciento de las lámparas conocidas fueron recuperadas en el interior de cuevas. El resto provienen de yacimientos situados al aire libre, abrigos rocosos expuestos a la plena luz del día y accesos o entradas de las cavernas. El número de lámparas halladas en cada sitio (un promedio de dos a tres) no difiere gran cosa, ya se trate de cuevas, de abrigos o de campo abierto.

En las cuevas hondas se recuperan a menudo lámparas en las zonas de paso obligado, por ejemplo en las entradas, en los cruces de las distintas galerías y a lo largo de los muros. Diríase que las lámparas se colocaban en puntos donde fácilmente se las pudiese encontrar y volver a utilizar. El descubrimiento de muchas lámparas juntas —el caso más notable es el de Lascaux, donde se han recogido 70— indica que mientras no eran utilizadas se las almacenaba en determinados lugares. Por desgracia, no se puede deducir qué cantidad de lámparas eran encendidas a un mismo tiempo.

Las lámparas se suelen descubrir en la proximidad de lugares donde se hacía fuego. Quizá las calentasen previamente arrimándolas a la hoguera para que la grasa se fuese caldeando y se hiciese más fácil su ignición, o quizás aprovechasen aún como piedras de fogón las lámparas ya abandonadas. Es más probable que los sitios en que se encendía el fuego sirvieran de centros de reunión y de puntos de referencia por los que se orientasen los individuos en sus idas y venidas a través de la oscuridad. Muchas lámparas se encuentran invertidas en el suelo, lo que supone que la gente, cuando regresaba al hogar, las apagaba sencillamente volviéndolas del revés.

Hay al menos una localidad donde parece que estuvo fija una lámpara como permanente fuente de luz para los que allí acampasen. Los arqueólogos hallaron dos lámparas dentro de una pequeña cavidad natural de la pared rocosa del abrigo de La Garenne. Una de ellas había sido invertida como para extinguir su llama. La otra estaba colocada derecha dentro de una hendidura natural de la roca, de la que no sobresalía. La misma cavidad serviría seguramente de reflector natural, aumentándose así el efecto luminoso de la lámpara.



6. EL ARTE DE LAS CAVERNAS PREHISTORICAS debió de necesitar iluminación artificial tanto para ser creado como para ser contemplado. La débil y vacilante luz proporcionada por las lámparas en que se quemaba grasa animal quizá fuese parte integral del efecto que se pretendía causasen esas pinturas prehistóricas.

Clasificando y organizando la muestra de lámparas de quemar grasa, tratamos de averiguar cuánto fueron cambiando su abundancia y su diseño a lo largo del tiempo. Este análisis es algo limitado por la falta de datos. Sólo para las lámparas de recuperación tardía se dispone de mediciones radiactivas precisas. En la mayoría de los casos, la antigüedad de los ejemplares se infiere de los lechos arqueológicos en que se los encuentra, y en muchas de las excavaciones primeras ni siquiera se registraba este detalle.

Aparecen muchas más lámparas en el último período cultural del Paleolítico Superior, el Magdaleniense, que en los períodos precedentes. Esto quizá refleje simplemente el hecho de que se conocen más yacimientos del período magdaleniense que de cualquier otro anterior, así como el hecho de que la mayoría de las pinturas del interior de cuevas fueron realizadas en el Magdaleniense. Añádase que las lámparas más antiguas son también las más difíciles de identificar con certeza.

La forma de las lámparas parece haber evolucionado sorprendentemente poco a través de las edades. Hubo alguna variación en el material y en el diseño, pero no se advierte ninguna progresión clara de lo tosco a lo refinado. Aunque las dotadas de mango esculpido son más comunes en los períodos posteriores, los tres tipos primarios de lámpara se encuentran a lo largo de todo el Magdaleniense, e incluso las de traza más elaborada se remontan a los primeros tiempos del Paleolítico Superior, que corresponden aproximadamente a los de la aparición en Europa de los Cro-Magnon, los primeros humanos modernos desde el punto de vista anatómico.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PALEOLITHIC LAMPS AND THEIR SPECIALIZATION: A HYPOTHESIS. S. de Beaune en *Current Anthropology*, vol. 28, n.º 4, págs. 569-577; agosto/octubre de 1987.

TECHNOLOGICAL CHANGES ACROSS THE MIDDLE-UPPER PALEOLITHIC TRANSITION: ECONOMIC, SOCIAL AND COGNITIVE PERSPECTIVES. P. Mellars en *The Human Revolution: Behavioural and Biological Perspectives on the Origins of Modern Humans*. Dirigido por P. Mellars y C. Stringer. Princeton University Press, 1989.

NONFLINT STONE TOOLS OF THE EARLY UPPER PALEOLITHIC. Sophie de Beaune en *Before Lascaux: The Complex Record of the Early Upper Paleolithic*. Dirigido por H. Knecht, A. Pike-Tay y R. White. CRC Press,1993.

Bosques de inundación amazónicos

Algunas zonas de la selva se comportan, a la vez, como ecosistemas acuáticos y ecosistemas terrestres. Gracias al desarrollo de una adaptación particular, muchísimas especies medran en los bosques inundados

Michael Goulding

Si estuviera usted volando sobre la pluviselva que bordea los ríos de la cuenca del Amazonas en la estación lluviosa, vería su avioneta reflejada en las calvas de la espesura. El espejo gigantesco que yace bajo la bóveda arbórea es una extensa lámina de agua fluvial. En efecto, durante seis o siete meses al año, los tramos bajos de los ríos crecen e invaden la llanura circundante. La selva se inunda. Hasta 10 metros sube el nivel del agua, que deja totalmente sumergida la vegetación del sotobosque.

Estos bosques anegados, que representan el 3 % del total de la selva amazónica, constituyen una pieza clave para comprender el ecosistema más rico del mundo. A lo largo de los últimos veinte años, se ha sucedido un rosario de hipótesis para dar cuenta de la increíble diversidad biológica que ofrece la pluviselva. Varios han defendido que en períodos secos, los de intensa glaciación sobre todo, la selva estaba dividida en parcelas discontinuas o refugios donde las especies evolucionaron gracias al aislamiento geográfico de los acervos de genes; en las épocas interglaciales, con el retorno de condiciones más húmedas, las nuevas especies se dispersarían desde sus centros de origen hacia la selva en expansión.

Pero recientemente, y en estas mismas páginas, Paul A. Colinvaux, de la Universidad estatal de Ohio, denunciaba que la hipótesis de aridez extrema y contracción de la selva se fundaba en pruebas circunstanciales. Para Colinvaux, la riqueza biológica del Amazonas se explica mejor si se admite que la selva, muy heterogénea, se halla en cambio constante. Habría diversos ecosistemas porque son infinitos los tipos de suelos, dispares las condiciones climáticas, plurales las cuencas de erosión y los ríos. Las comunidades cambian al compás de las condiciones locales; por ejemplo, si un río modifica su curso o varían la pautas de comportamiento de la pluviselva.

En mi opinión, los bosques inundados constituyen un caso palmario de comunidades que experimentan cambios profundos y constantes. Esas zonas fomentan la biodiversidad porque las plantas y los animales necesitan adaptaciones especiales para vivir allí. Muchas especies de las llanuras de inundación no suelen darse en los altiplanos (*terra firme*). Al propio tiempo, muchos géneros presentan unas especies en los bosques anegados y otras en los bosques enjutos, situación que proporciona una ocasión de privilegio para realizar estudios comparados de filogenia y bioquímica.

Los bosques inundados ocupan 150.000 kilómetros cuadrados de los cinco millones que abarca la superficie de la pluviselva amazónica. La profundidad de los ríos de las zonas bajas fluctúa en promedio de 7 a 13 metros por año; en la parte central de la cuenca, las aguas de crecida se expanden hasta 20 kilómetros selva adentro, por ambos lados del cauce. Los bosques cercanos al estuario se hallan también sujetos a episodios de inundación, si bien a una escala diaria más que estacional. Por dos veces al día, la marea empuja parte del enorme caudal de agua dulce hacia los bosques que bordean el estuario. Abundan los manglares donde se concentra agua salobre o salada del océano Atlántico.

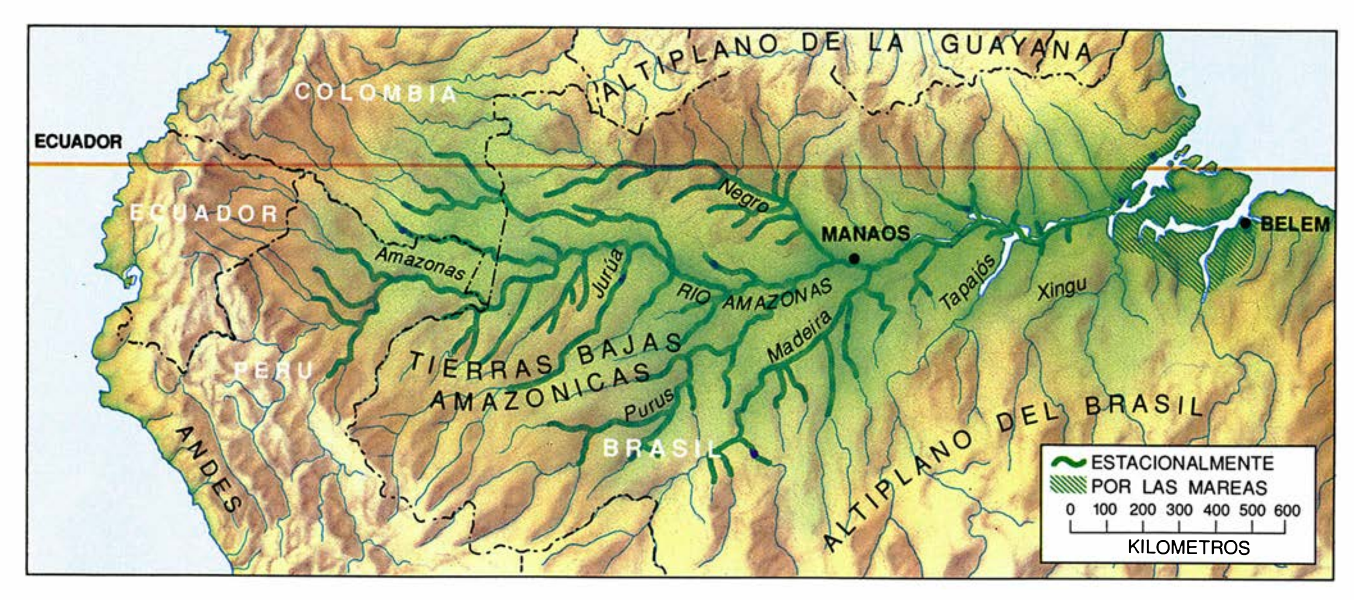
La distribución de la flora de los bosques inundados está entrañada en la historia del río. Antes de la orogénesis de los Andes, el Amazonas discurría hacia el oeste, para desembocar en el océano Pacífico por el golfo de Guayaquil, en Ecuador. Con el levantamiento andino, que comenzó hace 15 millones de años en el Mioceno, el río excavó un nuevo cauce hacia el este, abriéndose un paso por entre los escudos de Guayana y Brasil. A partir de ese cambio empezó, verosímilmente, la expansión del bosque inundado por mareas. El sedimento arrastrado desde los Andes formó la mayoría de las islas del archipiélago estuarino, ofreciendo así una extensa superficie apta para la colonización arbórea.

El cambio de curso fomentaría la diversidad floral de muchos bosques inundados, permitiendo, al mismo tiempo, la diseminación de algunas especies. Los árboles de los bosques anegados suelen echar fruto en los períodos de caudal alto, cuando las semillas pueden ser arrastradas por la corriente. Antes del levantamiento andino, el río transportaba de este a oeste las semillas de los árboles de la llanura inundada. Pero una vez que

MICHAEL GOULDING ha vivido durante 16 años en la cuenca amazónica y ha escrito cinco libros sobre varios aspectos de los ríos de la región. Tras doctorarse, en 1978, por la Universidad de California en Los Angeles trabajó en el Instituto Nacional para Investigación Amazónica de Manaus y en el Museo Goeldi de Belém. Integrado ahora en la Alianza en pro de la Pluviselva, con sede en Nueva York, encabeza el proyecto para la conservación y gestión de los ríos y los peces de la cuenca amazónica.

1. ALGUNAS PARTES de la selva amazonica están sumergidas bajo unos 10 metros de agua hasta siete meses al año. La adquisición de especiales adaptaciones permite a una flora única y a su fauna asociada sobrevivir en tan duras condiciones.







2. LA CUENCA DEL AMAZONAS, que cubre unos 6,5 millones de kilómetros cuadrados, semeja un enorme embudo geográfico que drena los Andes orientales, la extensa llanura amazónica y la meseta de Guayana y la del Brasil. Los bosques inundados crecen a las márgenes de los ríos de caudales fuertemente estacionales de la región, así como en la zona cubierta por las mareas del estuario; constituyen el 3 por ciento del total de la pluviselva.

el Amazonas abocó en el Atlántico, algunas especies que quedaron aisladas en el oeste pudieron colonizar las llanuras de inundación de la zona oriental. Ese proceso explicaría por qué ciertos cauchos (género *Hevea*) se encuentran tan extendidos en los bajíos.

Los cambios en el nivel del mar desde el Pleistoceno temprano, hace unos 1,8 millones de años, indujeron profundas transformaciones en la configuración de los bosques inundados. Los ríos ahondaron su lecho y drenaron las llanuras de inundación cuando descendía el nivel del mar, o se desbordaban si subía. Esas pautas diversas sugieren que los bosques de los márgenes fluviales estaban ya sujetos a importantes perturbaciones. Cambios que, a su vez, promovieron fenómenos de especiación, pues los bosques se renovaban sin cesar con nuevas combinaciones de especies mejor adaptadas al sistema de inundaciones propio del tiempo geológico.

En la biodiversidad de los bosques anegados ha influido también la composición química de los ríos. Alfred Russel Wallace, naturalista del siglo XIX, dividió los ríos amazónicos en tres grupos: los de agua blanca, los de agua clara (o agua azul) y los de agua negra. Los ríos de agua blanca, así el Amazonas y el Madeira, son fangosos y de un color café con leche o blancuzcos porque acarrean cantidades ingentes de limos extraídos de los Andes. Presentan un *p*H neutro o básico y contienen elevadas concentraciones de nutrientes.

Los ríos de aguas claras, como el Tapajós y el Xingú, nacen en los escudos de Brasil y las Guayanas, hacia el norte y sudeste de las tierras bajas amazónicas, donde la escasa erosión existente explica la menguada contribución de esos afluentes a la carga de sedimento. Son también ligeramente ácidos.

A diferencia de los ríos blancos y de aguas claras, los negros se originan en las tierras bajas. Pese a transportar pocos sedimentos, sus aguas están coloreadas por compuestos lixiviados de las plantas. El agua negra se forma cuando la tasa de fijación de carbono por la fotosíntesis y la conversión parcial de compuestos del carbono en ácidos orgánicos solubles excede la tasa de descomposición total en dióxido de carbono. En el caso del río Negro, uno de los cuatro ríos más caudalosos del mundo, los ácidos de las plantas se originan en comunidades de vegetación xerófita y enana —la llamada *caatinga*, *campina* o *campinarana*— que medran en los suelos arenosos de las márgenes fluviales. Estos suelos, a diferencia de las arcillas de la mayor parte de la cuenca amazónica, no disponen de elementos descomponedores o que atrapen grandes cantidades de los compuestos secundarios de los vegetales. Conforme esos materiales van penetrando en arroyos y ríos, tiñen el agua de tonos marrones. Las aguas, muy ácidas, contienen pocos nutrientes.

La composición química del suelo y del agua de los bosques anegados guarda una relación directa con el tipo de río. Pero estamos lejos de conocer los factores químicos que influyen en la distribución de las especies de los bosques inundados. Ghillean T. Prance, de los Reales Jardines de Kew, y João Murça Pires, del Museo Goeldi de Belém, han observado que las llanuras de inundación de distintos tipos de ríos muestran importantes diferencias florísticas. En general, los bosques de mayor porte y diversidad son los que bordean ríos de aguas blancas. Los ríos de aguas negras y aguas claras parecen compartir más especies entre sí que con los ríos de aguas blancas.

La especies arbóreas de los bosques inundados suelen diferir de las que medran en la *terra firme*. Pero también es frecuente que, de un mismo género, una especie esté adaptada a la *terra firme* y otra a los bosques inundados: *Astrocaryum jauary*, la palmera predominante de las llanuras anegadas de los bajíos, cede el paso, llegada a la *terra firme*, a *Astrocaryum tucuma*, especie que rehúye los hábitats

inundables. La existencia de estas parejas sugiere que las comunidades inundadas tienen ciertas adaptaciones bioquímicas que les permiten sobrevivir largos períodos de anegamiento, aunque se ignora cuáles sean. No hay unas adaptaciones estructurales obvias, y pocas especies presentan raíces aéreas, lo que constituiría la respuesta ideal ante la escasez de oxígeno en la zona de radicación. Pese a la inundación y la merma de oxígeno durante la mitad del año, los árboles mantienen, sin embargo, su verdor; el bosque entero, por encima y por debajo del agua, se muestra con el mismo lustre que su equivalente de tierra enjuta.

Hay plantas adaptadas a la vida permanente entre condiciones pantanosas. En estas comunidades, de menguada biodiversidad, dominan la palmera *Mauritia flexuosa* y alguna más. Para sobrevivir, la mayoría de los bosques inundados necesitan de un período seco, aunque sea breve; en los bañados por las mareas, este respiro lo proporcionan las horas de bajamar.

A la manera de las plantas, hallamos géneros animales con una especie adaptada a medios anegados y otra a zonas secas. La biodiversidad animal que observamos florecer en los bosques pantanosos da una fuerte indicación de que estos tipos de hábitat han persistido al menos desde el Cenozoico temprano, hace 65 millones de años. Aunque faltan recuentos de las especies de artrópodos, en tales bosques, su diversidad supera de mucho la de los vertebrados.

La fauna de artrópodos de los bosques inundados difiere, además, de la existente en los bosques secos adyacentes en lo concerniente a la composición de especies y a su comportamiento. Joaquím Adis, del Instituto Max Plank de Limnología en Plön, y Terry L. Erwin, de la Institución Smithsoniana, consideran los bosques inundados refugios a corto plazo y centros evolutivos a una escala de tiempo más larga. La crecida de los ríos junta las especies del suelo con las que viven en los árboles: los artrópodos del suelo migran hacia arriba para escapar de la inundación. En su opinión, la concentración de artrópodos en la bóveda arbórea durante seis meses aumenta la competencia y la presión depredadora; sostienen, en consecuencia, que estos factores han promovido fenómenos de especiación. Para Adis y Erwin, los coleópteros carábidos terrestres que se han visto forzados a subir a los árboles habrían desarrollado adaptaciones para competir con sus parientes arborícolas. Este compromiso adaptativo estacional podría desembocar en un proceso de especiación.

El grado de vinculación ecológica de los vertebrados con los bosques inundados varía de unos ejemplos a otros. En los grandes reptiles amazónicos asociados a los ríos y la selva destaca su cuantía más que su diversidad (cocodrilos o caimanes y tortugas abundaban antes de que la caza diezmara sus poblaciones). Seis especies de tortugas de la familia Pelomedusidae, instaladas en los bajíos, emigran hacia los bosques inundados para alimentarse de frutos y semillas que caen en el agua. *Podocnemis expansa*, una de ellas, es la mayor tortuga fluvial del mundo. Las tortugas pudieron haber sobrevivido en el Amazonas durante 65 millones de años gracias a la existencia continuada de bosques inundados; podemos atribuir su alta concentración a la capacidad demostrada de nadar a través de arboledas inundadas y hallar fácil alimento.

Lagartos teíidos e iguanas constituyen los otros grandes reptiles cuya distribución y comportamiento están ligados a los bosques de inundación. Saltan de los árboles al agua cuando sienten aproximarse a las aves depredadoras. Los lagartos teíidos están adaptados a alimentarse en el agua: se sumergen para cazar moluscos y camarones.

También los mamíferos acuáticos habitan en las aguas de los bosques. Los manatís no rechazan las hojas de ciertos árboles, aunque prefieren plantas herbáceas. El delfín boto o inia (*Inia geoffrensis*), otro inquilino del lugar, pertenece a los cetáceos Platanístidos. De esta familia arcaica hay especies en ríos de China y la India, amén de una forma marina en las costas de Argentina. A diferencia de los delfínidos, la inia y otros componentes del grupo poseen cuello y cabeza flexibles, ya que las vértebras cervicales no están fusionadas como ocurre en otras familias. Las inias, casi ciegas, confían en la ecolocación, o sonar, para navegar. Merced a esa capacidad de mover la cabeza a un lado y otro, se mueven con presteza por entre el laberinto de troncos.

Por contra, el delfín tucuxi (*Sotalia fluviatilis*), privado de esa facultad, no osa adentrarse en la selva inundada. La inia persigue a los peces hasta dentro del bosque, mientras que el tucuxi permanece en el cauce del río, en canales o en lagos. Menos rauda que sus parientes delfínidos, la inia salva los escollos con su fina capacidad de ecolocación. Tal vez su adaptación a los bosques inundados y otros hábitats complejos le permitió sobrevivir en la onda evolutiva de los delfines más avanzados.

La presencia de tres especies de monos que sólo excepcionalmente abandonan los bosques de la zona inundada denuncia otra forma de presión evolutiva. Aunque no está claro por qué el tití pigmeo (*Cebuella pygmaea*) y las dos especies de uácaris (*Cacajao*) restringen su territorio, podríamos atribuirlo, más que a una competencia por el alimento, a la progresión de las enfermedades o del parasitismo. Aunque no se ha investigado la epidemiología de los animales de los bajíos inundados, sabemos que hay diferencias notables en la incidencia de ciertas enfermedades humanas, prueba de



3. QUIMICA DE LOS RIOS y su amplia variación en la cuenca amazónica. Lo percibimos con toda nitidez en la confluencia del río Tapajós, de aguas claras, y el río Amazonas, de aguas blancas. Los ríos de aguas claras a menudo son ligeramente ácidos y pobres en nutrientes, pero aun así albergan una rica flora y fauna gracias a los bosques inundados. Los ríos blancos, cargados de sedimentos, tienen menor acidez y mayores concentraciones de nutrientes.

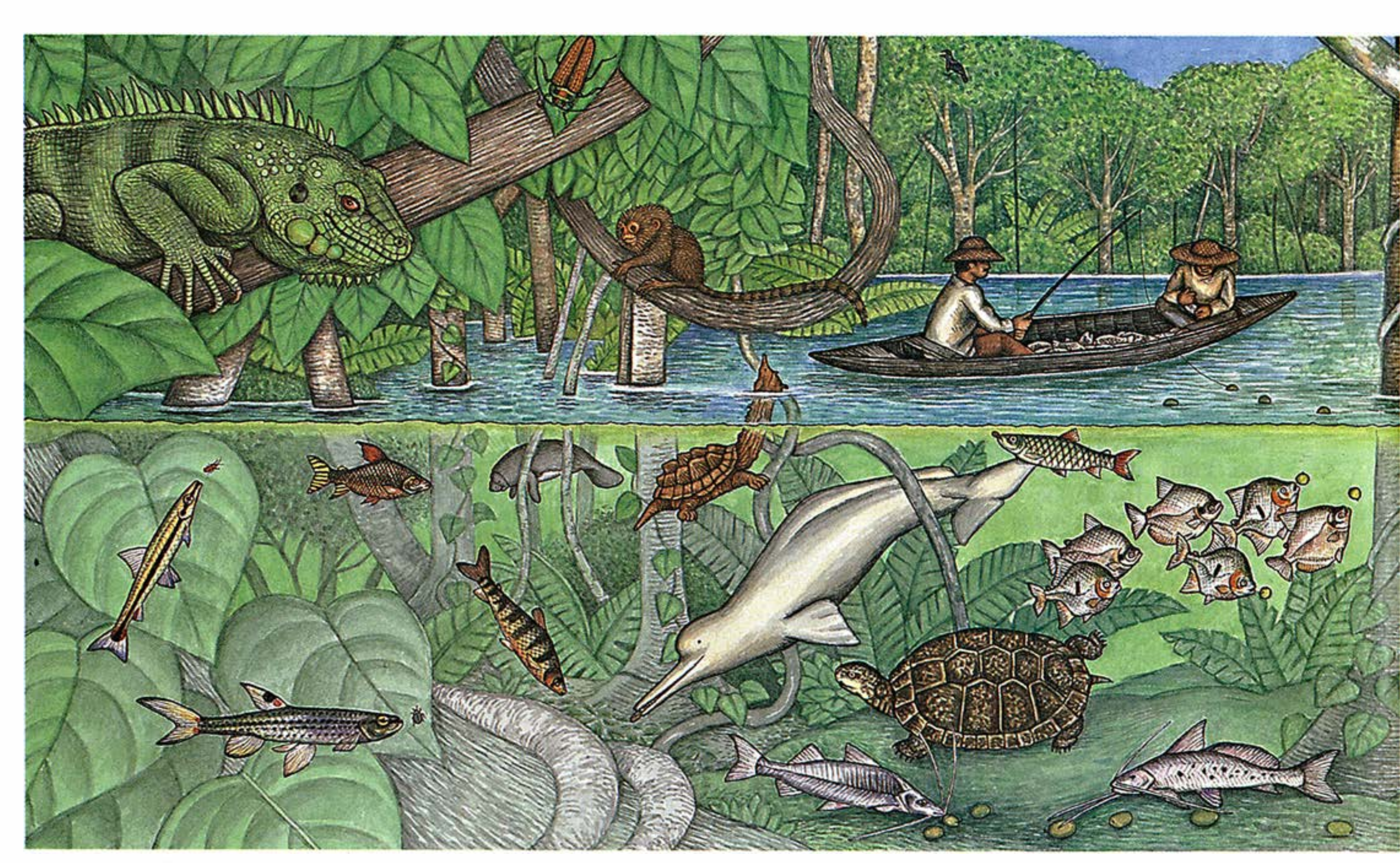
que los vectores se vincularían a un hábitat o al otro. Los estudios de Jeffrey J. Shaw, del Instituto Evandro Chagas de Belém, revelan que la leishmaniasis no se instala en las llanuras inundables de los ríos blancos porque allí no crían las moscas que transmiten la enfermedad. A su vez, los mosquitos transmisores del paludismo no medran en las zonas de desbordamiento de los ríos negros, por una doble razón: la escasez de nutrientes y la elevada acidez de sus aguas impiden el desarrollo de sus larvas. Los llanos de inundación podrían haberse convertido en refugios epidemiológicos para algunos animales vulnerables.

De todos los vertebrados, el grupo que, con mucho, despliega mayor diversidad y abundancia en los bosques inundados es el de los peces: la cuenca del Amazonas aloja la fauna piscícola más rica del mundo. Hasta 3000 especies podría haber, de las que sólo se han descrito unas 1800. El recuento que yo mismo realicé junto con Mirian Leal Carvalho, del Secretariado Nacional del Ambiente de Brasilia, y Efrem G. Ferreira, del Instituto Nacional de Investigaciones del Amazonas (INPA) en Manaus, señalaba que el río Negro albergaría unas 600 especies, cifra que supera el registro de América del Norte entera.

La presencia en la cuenca amazónica de 200 clases de peces, como mínimo, que se alimentan de semillas y frutos respalda la hipótesis según la cual los bosques inundados, aunque sujetos a un cambio constante, han persistido durante largos períodos, ocupando extensos tramos. Quizás estos hábitats sean incluso anteriores a la aparición de las plantas angiospermas, cuyo desarrollo espectacular ocurrió en el período Cretácico (hace 140 a 65 millones de años), predominantes hoy en las pluviselvas. Por supuesto, todos los peces amazónicos frugívoros evolucionaron después de la conquista del bosque tropical por las plantas con flores. A este respecto, Klaus Kubitzki, de la Universidad de Hamburgo, observó que los peces gato se alimentaban de las pulposas semillas de *Gnetum*, una primitiva gimnosperma trepadora que abunda en los bosques inundados.

En depósitos de fósiles africanos se han descubierto esqueletos fosilizados de peces con dientes similares a algunas de las especies frugívoras del Amazonas. Pero no deja de resultar sorprendente la ausencia de peces frugívoros en la cuenca del río Zaire, a pesar de que este sistema forma una gran red de brazos fluviales interconectados que alimentan a bosques inundados. De cualquier modo, la cuenca del río Zaire presenta una mayor altitud y durante el Pleistoceno sufrió períodos secos más frecuentemente que la cuenca amazónica.

Los principales peces frugívoros de los bosques del Amazonas son los carácidos y los peces gato. Durante los pe-



4. LOS BOSQUES INUNDADOS se hallan henchidos de organismos, por encima y dentro del agua: quizás allí se reúne la más rica colección de organismos arborícolo-acuáticos del planeta. A pesar de la falta de oxígeno en su zona de enraizamiento, las plantas sumergidas, dotadas de adaptaciones especiales, permanecen tan fragantes como sus equivalentes de los bosques de suelos enjutos.

ríodos de inundación, se apostan debajo de los árboles o nadan a través de la vegetación del sotobosque buscando alimento. Sólo los carácidos se hallan armados de una dentadura potente para cascar las nueces. Los peces gato engullen los frutos de una vez. Cuando los peces ingieren frutos enteros, las semillas atraviesan, ilesas, el tracto digestivo y luego son dispersadas. Nos sentimos inclinados a pensar que peces y árboles han evolucionado en una relación de mutualismo. A pesar de que las aves, los murciélagos y los monos son también importantes agentes dispersadores, su acción es secundaria respecto a la de los peces, por la simple razón numérica de mayoría de éstos. Los peces recogen los frutos perdidos por los animales que buscan su alimento en la bóveda.

El frugívoro mejor conocido de la cuenca amazónica es el tambaqui (*Colossoma macropomum*), un caracínido que alcanza el metro y pesa 30 kilogramos. Debe su fama a su aprovechamiento comercial. Su ciclo vital resume el modo en que los peces se sirven de los bosques inundados y los distintos tipos de ríos. Las larvas y los alevines del tambaqui residen en las llanuras inundadas de las márgenes fluviales, que reciben una aportación anual de nutrientes procedentes de los Andes. Estos nutrientes sostienen la producción, bastante alta, de plantas herbáceas y de fitoplancton. El zooplancton medra entonces con tal esplendor que confiere una apariencia caldosa a las aguas de la zona inundada. Los tambaqui tienen numerosas hileras de branquias, finas y alargadas, que les sirven para capturar al zooplancton del agua. Los peces jóvenes también se alimentan de semillas de plantas herbáceas de las praderas flotantes y de pequeños frutos y semillas de los bosques circundantes.

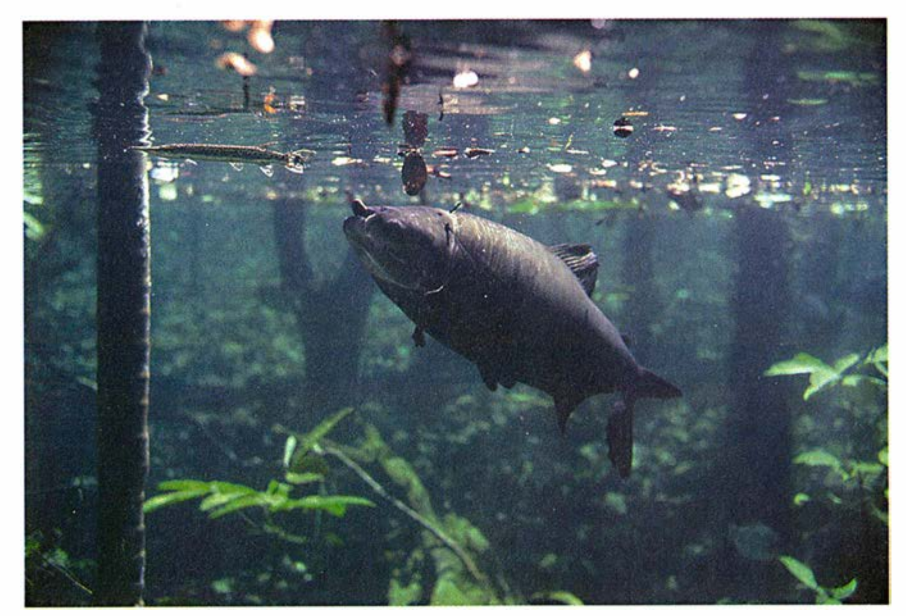
En experimentos de piscicultura se ha comprobado que *C. macropomum* alcanza la madurez a la edad de cuatro o cinco años. Los peces abandonan en ese momento sus hábitats nido y emigran curso adentro, donde desovan a principios de la estación de crecidas. Pasan luego a los bosques anegados, no importa por qué río, y permanecen alimentándose durante unos seis meses. Cuando los bosques se secan, los adultos se retiran a los canales de los ríos y allí pasan el resto del año viviendo de las reservas adiposas acumuladas.

En los bosques inundados por las mareas se ven menos peces frugívoros que en las tierras del interior. Una de las especies que más abundan allí parece capacitada para vivir en ambos medios, en las florestas inundadas por mareas y en las anegadas por las crecidas de los ríos. Las crías de *Doras dorsalis*, un gran pez gato, permanecen en el estuario, yendo y viniendo del bosque con la marea. Se alimentan de frutos, hojas de aro y moluscos. Los adultos viajan a las cabeceras de los ríos; aquí los pescadores los capturan en el propio cauce o en los bosques estacionalmente inundados, donde se alimentan de frutos pulposos.

Aunque no se ha podido cartografiar el proceso migratorio de estos peces, la propia separación entre poblaciones de jóvenes y de adultos nos obliga a pensar en una estrategia evolutiva para relajar la competencia. Así ocurre con muchas otras especies de peces gato depredadores.



LAGARTO TEIIDO
MONOS UACARIS
ELATERIDO
HOAZIN
PEZ AROUANA
CICHLA
TAMBAQUI
BANCO DE CARACIDOS VOLADORES
CARACINIDO
PEZ GATO BACU
CURIMATIDO
DISCUS





5. EL TAMBAQUI, uno de los peces de mayor aprecio comercial de la región amazónica, se alimenta de las semillas de los árboles del caucho en el bosque inundado (*izquierda*). Los peces frugívoros tienen una dentadura sólida y robusta, adaptada para cascar y triturar las nueces (*derecha*).

El traslado hacia la cabecera del río del segmento adulto de la población reduce la competencia por unos recursos nutritivos limitados entre los miembros de la especie. Competencia que pudo favorecer el breve tiempo que, por culpa de la marea baja, tenían para alimentarse en los bosques estuarinos. La producción masiva de frutos dura cuatro o cinco meses en ambos bosques, pero las mareas bajas acortan a la mitad el tiempo que los peces permanecen en las comunidades estuarinas.

Otros peces de estos bosques dependen del suministro de insectos que merodean por la bóveda. Descubrimos más de 80 especies de peces en el río Negro que se alimentaban de artrópodos, sobre todo de coleópteros y arácnidos. Aunque se ignora la razón de esa lluvia de artrópodos que caen, pudiera estribar en su alta densidad. La inundación provoca que los insectos se arremolinen en las partes emergentes de los troncos y en las copas. El viento y la precipitación se encargan de desalojarlos.

No conocimos especies que limitaran su dieta a uno o muy pocos grupos de insectos o de arañas. La mayoría de los insectívoros son peces pequeños, inferiores a los 20 centímetros. Pero como establecieron ya Stanley H. Weitzman y Richard P. Vari, de la Institución Smithsoniana, la fauna piscícola del Amazonas se caracteriza por la cantidad ingente de especies de talla pequeña. Entre estas miniaturas se encuentran los ejemplares de acuario; así, los carácidos voladores (*Gasteropelecidae*), cuyas amplias aletas pectorales les permiten saltar desde el interior del agua y atrapar insectos. La miniaturización de la fauna piscícola podría haber evolucionado en repuesta a la oportunidad de comer insectos que ofrecen los bosques inundados. Las especies pequeñas aciertan más en la captura de insectos y arañas que los peces grandes. En un hábitat tan complejo, podría ser difícil que alguna o muy pocas especies monopolizara la fauna de artrópodos que contribuye a la cadena trófica.

Las hojas y el material leñoso sirven también de sustento. Aunque muy pocas especies comen hojas frescas en gran cantidad, las hojas en vías de descomposición forman la base de la cadena trófica. En el río Negro, encontramos más de 130 especies de peces que se alimentaban, en diverso grado, de detritos. El más peculiar de los detritívoros pertenece al género *Semaprochilodus*, carácido dotado de dientes finos a modo de cerdas en la parte exterior de sus labios; éstos se evaginan y conforman un órgano de succión idóneo para aspirar detritos finos.

La ecología de la alimentación de las especies de *Semaprochilodus* guarda una estrecha relación con los bosques inundados. Los peces absorben grandes cantidades de detritos de las partes sumergidas de los árboles, como troncos, ramas y hojas. Van así acumulando grasa durante la estación de las lluvias. Aunque estos detritos suelen alojar microorganismos, las pruebas recogidas por Stephen H. Bowen, de la Universidad Técnica de Michigan, con peces similares, apoyan la idea de que los detritívoros no se podrían mantener sin la asimilación de material orgánico.

Los propios árboles enriquecen el material detrítico suministrándole nutrientes de la corteza en descomposición y quizá también exudados orgánicos. Las algas se concentran cerca de las comunidades detritíticas de estas aguas oligotróficas, y se suman a ellas. Los peces contribuyen a fertilizar los bosques circundantes reciclando nutrientes preciosos que, si así no fuera, quedarían bloqueados en el material detrítico. Esta función de reciclado de nutrientes que acometen los peces reviste particular interés en los bosques inundados de los ríos de aguas negras: por sus condiciones ácidas, largos períodos de inundación y suelos pobres en nutrientes, esa floresta presenta tasas muy bajas de descomposición.

A lo largo de los últimos diez años se ha prestado mucha atención internacional a la destrucción de la selva amazónica. Philip M. Fearnside, del INPA, estima que se ha talado del 6 al 7 por ciento de la selva para crear pastos. Se ha propuesto, a modo de opción alternativa a la deforestación del altiplano, el desarollo de la agricultura en las llanuras amazónico-andinas, de suelos mucho mejores que los de la *terra firme*.

Ganaderos de bovinos y de búfalos, cultivadores del yute y comerciantes de la madera han producido ya efectos devastadores en los bosques inundables. Sólo permanecen en pie entre un 15 y un 20 por ciento de estas áreas a lo largo de los 2000 kilómetros del curso bajo del Amazonas. De acuerdo con los cálculos de Fearnside, en los últimos veinte años se habrían destruido 325.000 kilómetros cuadrados de selva en la *terra firme*. Si la labor destructora se encamina ahora hacia las llanuras de inundación, y ésa

parece ser la idea de los ganaderos, los bosques de inundación desaparecerán de aquí a diez años.

La destrucción de los bosques anegados puede ser la amenaza más grave que se cierne sobre la biodiversidad amazónica. La atención prestada por los medios científicos y grupos de opinión a la deforestación de la *terra firme*, que ha eclipsado las pérdidas de los bosques inundables, se funda en la visión errónea de la selva amazónica como si se tratara de una túnica inconsútil. Las especies arbóreas de los bosques inundados, exclusivas, no pueden ser reemplazadas por especies de la *terra firme*. Más cierto es que los bosques inundados constituyen reservorios genéticos para colonizar la *terra firme*, que viceversa. Los árboles de los llanos de inundación pueden sobrevivir sin anegación, tal como se ha demostrado al plantarlos en zonas altas. Pero las especies del altiplano no pueden tolerar períodos largos de inmersión en el agua. Ello parece demostrar que la especiación se produjo desde las zonas de inundación hacia las zonas altas.

También son especies endémicas y únicas muchos de los animales que viven y dependen de los bosques inundados. La destrucción de estos hábitats podría causar la mayor pérdida de peces de agua dulce que se conoce en la historia humana. Esas especies, fuente principalísima de proteína animal para las tribus amazónicas, constituyen una razón económica poderosa para la conservación de sus hábitats. Sin embargo, tal como ocurre en muchas partes del planeta, no hay política eficaz que impida que los colonos transformen estos complejos ecosistemas en tierras de pasto. El que la prodigiosa biodiversidad de los bosques inundados pueda ser barrida de golpe produce escalofrío, incluso bajo el cálido sol tropical.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FISHES AND THE FOREST: EXPLORATIONS IN AMAZONIAN NATURAL HISTORY. Michael Goulding, University of California Press, 1980.

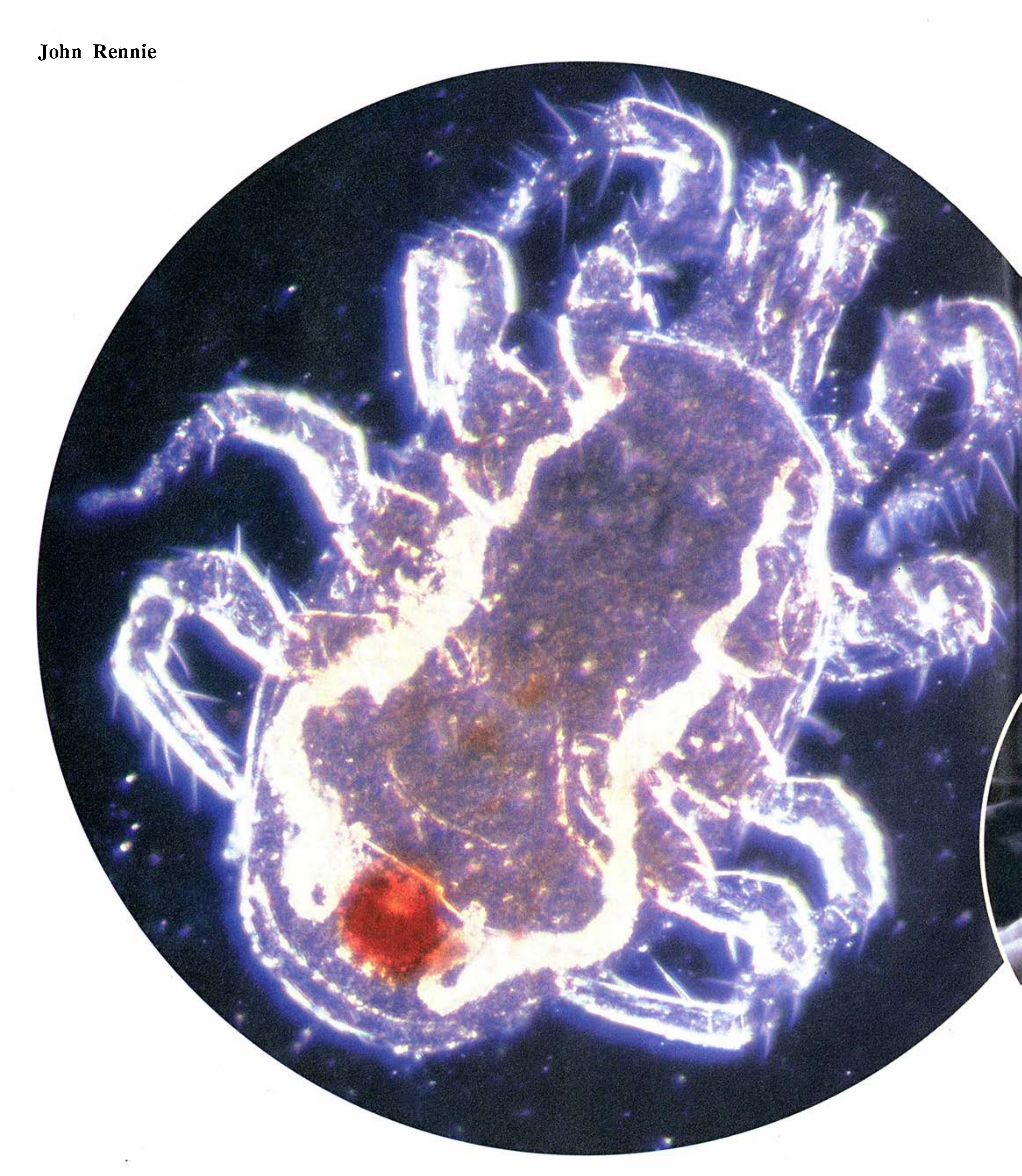
THE AMAZON: LIMNOLOGY AND LANDSCAPE ECOLOGY OF A MIGHTY TROPICAL RIVER AND ITS BASIN. Dirigido por Harald Sioli. Dr. W. Junk Publishers. Dordrecht, 1984.

KEY ENVIRONMENTS: AMAZONIA. Dirigido por Ghillean T. Prance y Thomas E. Lovejoy. Pergamon Press, 1985.

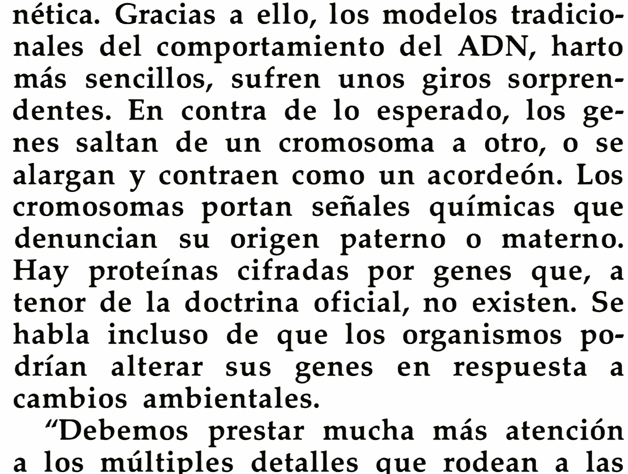
AMAZON: THE FLOODED FOREST. Michael Goulding. Sterling Publishing, 1990.

LOS NUEVOS GIROS DEL ADN

John Rennie



Se está gestando una genética distinta sobre nuevas bases, que habrá de modificar a su vez nuestras ideas sobre la evolución y la herencia de las enfermedades.



Margaret G. Kidwell boga contra corriente. Dos especies de la mosca del vinagre cohabitan en los botes de su laboratorio. Como no pueden aparearse entre ellas, cabe esperar que su destino sea permanecer genéticamente aisladas. Pero si Kidwell tiene razón, algún segmento de ADN acabará pasando de una especie a otra. La genética mendeliana clásica reputa imposible semejante tipo de herencia. Bien es verdad que Mendel nunca imaginó que los genes se movieran por el interior de los ácaros que parasitan las dos especies de moscas. Kidwell posee pruebas de la realidad de esa transferencia en la naturaleza.

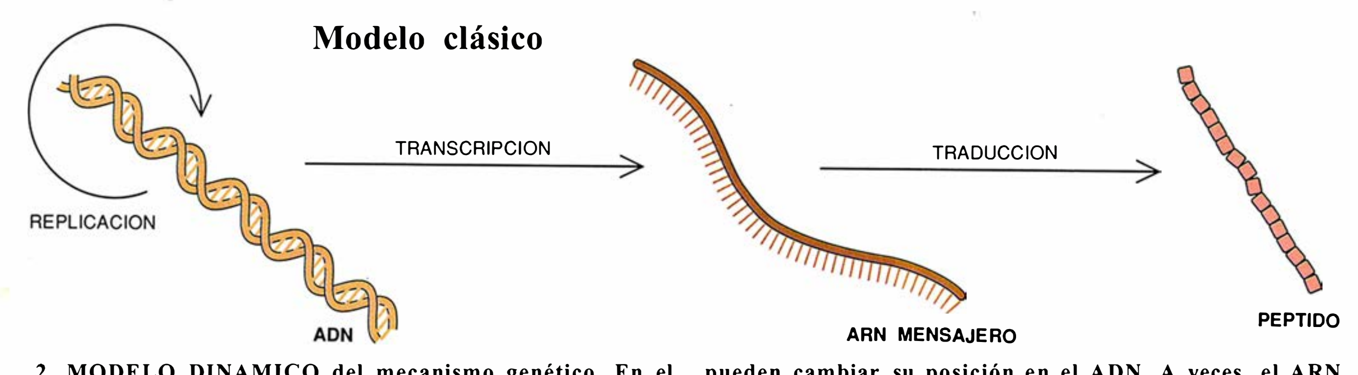
Las leyes de Mendel dejan abiertos unos resquicios del mayor interés. Las nuevas herramientas desarrolladas por la biología molecular para manipular cromosomas nos permiten conocer mejor la maquinaria genética. Gracias a ello, los modelos tradicionales del comportamiento del ADN, harto más sencillos, sufren unos giros sorprendentes. En contra de lo esperado, los genes saltan de un cromosoma a otro, o se alargan y contraen como un acordeón. Los cromosomas portan señales químicas que denuncian su origen paterno o materno. Hay proteínas cifradas por genes que, a tenor de la doctrina oficial, no existen. Se habla incluso de que los organismos podrían alterar sus genes en respuesta a cambios ambientales.

"Debemos prestar mucha más atención a los múltiples detalles que rodean a las formas en que los organismos hacen uso de las propiedades básicas del ADN, ARN y proteínas", afirma Joshua Lederberg; este premio Nobel demostró en los años cuarenta que las bacterias mantienen un intercambio sexual de material genético, idea que entonces rozaba la herejía, y hoy es un principio aceptado. También el nuestro es tiempo de heterodoxias, en el que se niega con rotundidad el supuesto carácter estable de la molécula de ADN; suerte de metabolito, "es parte de la célula y responde a lo que sucede a su alrededor", sentencia Jeffrey W. Pollard, de la Facultad de Medicina Albert Einstein.

La genética nació a mediados del siglo XIX, en el jardín del monasterio moravo donde Mendel experimentaba con guisantes. Las reglas matemáticas de la herencia que él y otros investigadores después desarrollaron se convirtieron en la piedra angular de la biología moderna. Ninguno de ellos sabía qué eran los genes, lo que



1. *ESTE ACARO* (izquierda) *puede haber transferido fragmentos de ADN de una especie de la mosca de la fruta a otra distinta, portándolo en su aparato bucal* (derecha). *Los biólogos prestan cada vez más atención a estos posibles casos de transferencia genética horizontal y a otros fenómenos que no encajan dentro de la genética tradicional. La mancha roja del abdomen del ácaro es pigmento procedente de una mosca de la fruta.*



2. MODELO DINAMICO del mecanismo genético. En el modelo tradicional (*izquierda*), el ADN se autorreplica. Los genes se transcriben en ARN mensajero, que se traduce directamente en péptidos, o bloques de proteínas. Tal como ahora se contempla (*derecha*), existen muchas actividades adicionales, de las cuales sólo se indican algunas. Los genes saltarines pueden cambiar su posición en el ADN. A veces, el ARN se retrotranscribe en ADN. Antes de su maduración la molécula de ARN mensajero debe sufrir varias alteraciones químicas. La traducción del mensajero puede llevar aparejada en algunos casos una recodificación, o reinterpretación, de su mensaje genético.

no impidió que describieran las líneas generales de la transmisión de caracteres. Hasta los años cincuenta, no se identificó el ADN (ácido desoxirribonucleico) con el material genético, incoando así la era de la biología molecular.

La sustitución de "gen" por "ADN" no alteró los fundamentos de la genética. En la mayoría de los artículos, seguía abordándose el ADN como una entidad ideal que, salvo mutaciones ocasionales, persistía inalterado en medio del turbulento ambiente interno de la célula. Se halló que la información genética estaba escrita en la doble hélice de ADN, en una secuencia formada por cuatro bases nucleotídicas. Una cadena sencilla de ADN actuaba de molde para sintetizar la complementaria de ARN mensajero (ácido ribonucleico), portadora de la información a los ribosomas. Estos orgánulos leían el ARN mensajero como si fuera una cinta de música, interpretando sus bases de tres en tres, y engarzando los aminoácidos correctos, hasta fabricar una proteína. Pero conforme se ha ido profundizando en la actividad del genoma (serie completa de genes de un organismo) y sus moléculas asociadas, se ha descubierto que sus propiedades y comportamiento ofrecen mayor diversidad y riqueza.

Genes saltarines

Uno de los primeros en percatarse del dinamismo del genoma fue Barbara McClintock, fallecida el año pasado. En 1947, mientras realizaba cruzamientos con el maíz, en el laboratorio de Cold Spring Harbor, McClintock observó patrones extraños en la herencia de la pigmentación, inexplicables por las reglas al uso. Después de darle muchas vueltas a sus resultados, llegó al convencimiento de que había genes que no tenían sitio fijo en el cromosoma, sino que saltaban de un punto a otro en cada generación. El calor y otros factores de estrés ambiental parecían incrementar la tasa de transposición de tales genes.

Como ocurrió con Mendel, la idea de McClintock de los elementos genéticos transponibles, transposones o "genes saltarines", languideció durante décadas. No se veía ningún indicio, en el flujo unidireccional de información que cursaba del ADN al ARN y las proteínas, que sustentara la posibilidad de movimiento génico. Pero a principios de los setenta la teoría de McClintock volvió por sus fueros. Los experimentos demostraban el traslado de segmentos de ADN, de un sitio a otro dentro del mismo cromosoma, o entre cromosomas distintos, provocando cambios en la expresión de los genes. El salto de un transposón a las proximidades, o al interior de un gen, por ejemplo, podía inactivarlo. McClintock recibió el Nobel en 1983.

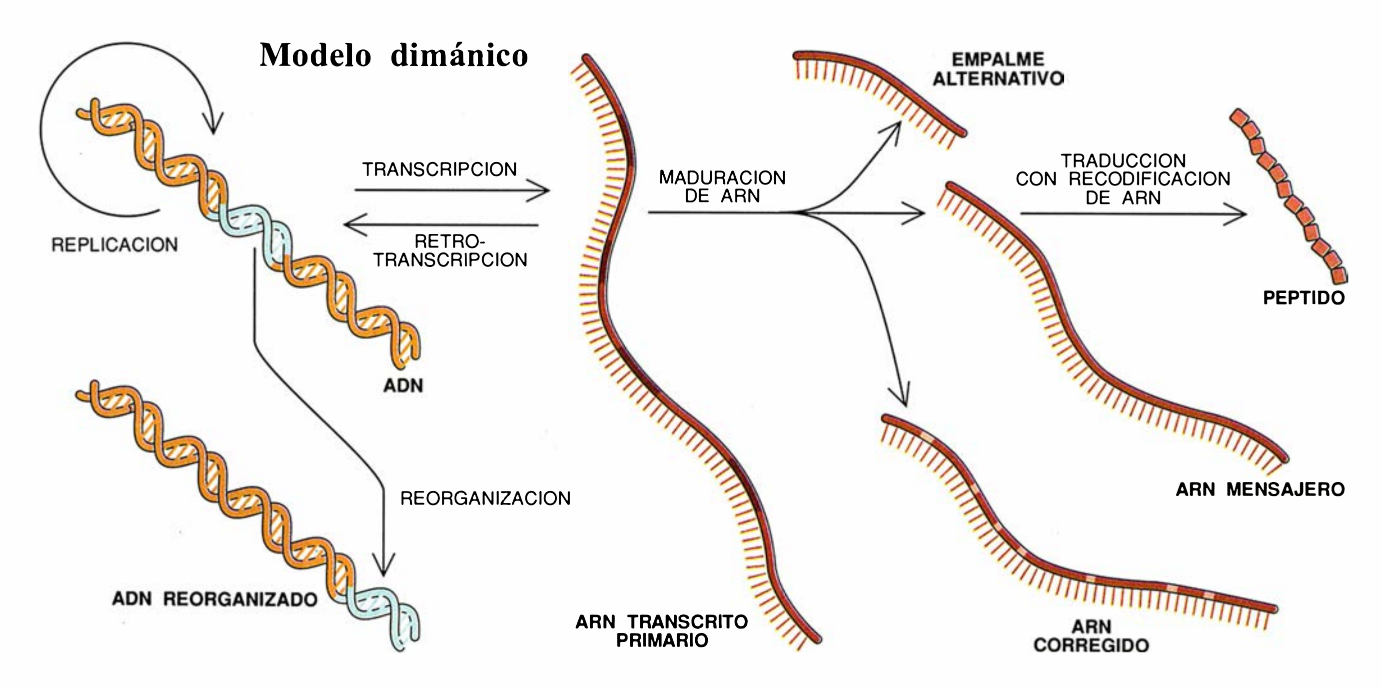
El origen de los transposones sigue siendo oscuro. Muchos los consideran una reliquia de virus integrados en el cromosoma de sus hospedadores. Algunos virus producen retrotranscriptasa, enzima que les permite convertir cadenas de ARN en ADN, revirtiendo así el flujo normal de información dentro de la célula. Los genes saltarines suelen utilizar un mecanismo similar para moverse. Algunos transposones portan su propia retrotranscriptasa, en tanto que otros aprovechan las enzimas producidas por elementos más capaces o por virus.

Cualquiera que sea su mecanismo de salto, los transposones ejercen un influjo poderoso sobre el organismo que los aloja. A ellos se han atribuido alteraciones genéticas en animales y plantas. Pueden incluso afectar al hombre. En 1991, el equipo de Francis S. Collins, de la Universidad de Michigan, identificó en un paciente la mutación causante de la neurofibromatosis, un tumor: tras la inserción de Alu, un elemento genético común, quedó bloqueada la actividad de un gen regulador del crecimiento celular. Dos meses después, el grupo encabezado por Haig H. Kazazian, de la Universidad Johns Hopkins, anunciaba que había cazado otro gen que acababa de saltar; mientras estudiaban hemofílicos, descubrieron la causa de la enfermedad en un niño: un transposón había inactivado el gen responsable de un factor esencial para la coagulación de la sangre. El transposón venía a ser idéntico a un gen que los padres del paciente portaban, sin embargo, en un sitio distinto.

Los elementos transponibles se suelen transmitir "verticalmente", de una generación a la siguiente, como los genes. ¿Podrían saltar "horizontalmente" de un organismo a otro e incluso entre especies diversas? Demostrado el intercambio de genes en las bacterias, se sospecha la existencia de transferencia entre bacterias y plantas e insectos. Nadie, sin embargo, ha comprobado que los transposones pasen de unos organismos superiores a otros. John F. McDonald, de la Universidad de Georgia, apunta que, desde hace muchos años, se han observado peculiares semejanzas genéticas entre especies sin relación de parentesco, si bien compartían un mismo hábitat. El fenómeno sugería poderosamente un trasvase de información genética entre ellas, pero no había forma de probarlo, y la hipótesis se descartaba.

Los ácaros sí pueden

Lo demostraron en 1991 Marilyn A. Houck y Kidwell, tras hallar pruebas de que cierto elemento transposón, el *P*, saltó de una especie a otra de la mosca de la fruta. A lo largo de los años setenta, Kid-



well y otros observaron una extraña incompatibilidad genética entre cepas de *D. melanogaster* procedentes del laboratorio y cepas cazadas en la naturaleza. Los cruzamientos de unas con otras eran a menudo estériles, o producían descendientes anormales, incompatibilidad que se atribuyó a la presencia de elementos *P* en las moscas silvestres. Sólo las que habían permanecido aisladas en el laboratorio durante años estaban libres de elementos *P*. La "epidemia" de elementos *P* debió haber comenzado unos 30 o 50 años antes.

Las secuencias génicas analizadas por Stephen B. Daniels, de la Universidad de Connecticut, revelan que los elementos *P* de *D. melanogaster* son virtualmente idénticos a los de *D. willistoni,* una especie distinta. Sería, pues, en los años cuarenta cuando algunos elementos *P* pasaron de las moscas *willistoni* a las *melanogaster*.

El mecanismo de dicha transferencia hubiera permanecido rodeado de misterio de no haber sido por un hecho fortuito: las cepas de Kidwell habían sido parasitadas por cierta variedad de ácaros. Houck, instalada en el piso inferior, recibió muestras del parásito para ver si encontraba alguna forma de exterminarlo. Pertenecía a la especie *Proctolaelaps regalis*. Al miscroscopio electrónico, su aparato bucal recordaba los finos tubos de cristal utilizados por los biólogos moleculares para realizar los experimentos de transferencia génica.

Tal semejanza sugirió a Houck que la naturaleza podía haberse servido de los ácaros para mediar en una suerte de ingeniería genética: tras alimentarse en una *D. willistoni*, el ácaro con un elemento *P* aún en la boca, o en el tubo digestivo, podría haberse deleitado con un huevo de *D. melanogaster*. Los elementos *P* que entraron así en el huevo pudieron integrarse en su ADN. Si el huevo sobrevivió, el resultado pudo ser una mosca con un elemento *P* procedente de otra especie. A Houck no le cabe la menor duda de que se trata de un fenómeno de transferencia horizontal. Kidwell corrobora, además, que los elementos *P* se propagan de manera desaforada, una vez integrados.

En la integración reside, por tanto, el nudo de la cuestión. Houck y Kidwell, que han demostrado que los ácaros llevan en su tubo digestivo elementos *P* reconocibles, se afanan en nuevos experimentos para cerrar el proceso de transmisión. Kidwell cría poblaciones de *D. melanogaster* y *D. willistoni* juntas, en presencia de ácaros, para reproducir la transferencia interespecífica; Houck está centrada en un aspecto más específico del problema.

No se descarta la intervención de los virus en los saltos entre especies. Durante muchos años, se concedió la posibilidad teórica de que los virus vehicularan los transposones, es decir, que transportaran éstos en su propia dotación genómica hasta otras células hospedantes. Consta al menos un ejemplo vírico de transposón que infecta a varias especies de insectos.

Si se demostrara que los elementos transponibles se mudan de una especie a otra, deberíamos concederles la categoría de agentes de cambio evolutivo. La doctrina darwinista tradicional enseña que la evolución procede gradualmente mediante la acumulación de mutaciones puntuales, encargándose la selección de eliminar lo inadaptado. Ahora bien, los defensores de los elementos transponibles prefieren admitir que éstos producen macromutaciones —cambios fenotípicos importantes y repentinos— en un tiempo menos dilatado. Suprimiendo la expresión de otros genes, los transposones actuarían a modo de reguladores genéticos, que, en el plano fenotípico, se traduciría en la aparición de nuevos patrones de desarrollo. En esa línea, Diane M. Robins, de la Universidad de Michigan, ha descubierto que la secuencia reguladora de un gen de ratón guarda un estrechísimo parecido con cierto segmento de transposón muy frecuente en el genoma del animal. La inserción y retención de ese componente del transposón en ese sitio determina que el gen sea sensible a ciertas hormonas.

Linda C. Samuelson ha aportado otros indicios de la incidencia, más benéfica, de los transposones en la evolución humana. En muchos mamíferos, el páncreas segrega amilasa, enzima necesaria para digerir los almidones de la dieta. Pero el hombre también segrega amilasa en su saliva, lo que parece útil para ampliar el rango de alimentos que puede ingerir. De acuerdo con Samuelson, un transposón sería el responsable de esta doble expresión de la amilasa mediante alteración de la regulación del gen de la enzima.

Se habla incluso del papel importante que desempeñarían los transposones en la originación de nuevas especies. Se les asocia, en particular, con el patrón de evolución "a saltos" del registro fósil; los organismos que vivieran en ambientes desconocidos sufrirían tensiones que intensificarían la fre-

cuencia de saltos en los genes. Como resultado de ello, los organismos experimentarían una mayor tasa de mutación y evolucionarían más deprisa.

Genes enormes

Cualquiera que sea el alcance de sus efectos, los genes saltarines representan un tipo de mutación no prevista por los fundadores de la genética. En los últimos años, se ha descubierto otro tipo de mutación que en muchos aspectos se aleja todavía más de la ortodoxia. Se trata de genes anómalos que adquieren de repente una talla enorme, con trágicas consecuencias. Su estudio ha llevado a comprender mejor extraños patrones de herencia asociados con varias enfermedades. Por ejemplo, el síndrome del X frágil, causa frecuentísima de retraso mental. Debe su nombre a la deformación cromosómica que presentan los afectados, quienes portan un cromosoma X cuyo extremo, en el brazo largo, se mantiene unido al resto a través de una hebra sutil de ADN. En 1991, los equipos de Jean-Louis Mandel, del INSERM, Grant R. Sutherland, del Hospital Infantil de Adelaida, y Stephen T. Warren, de la facultad de medicina de la Universidad de Emory, descubrieron que el origen de la enfermedad era una mutación hasta entonces desconocida.

En los individuos normales, el gen *FMR-1* contiene unas 60 repeticiones en tándem de cierta secuencia de bases formada por tres nucleótidos. Los portadores sanos del síndrome X frágil presentan hasta 200 copias de esa secuencia; en los individuos enfermos, la región de repetición, de tamaño desproporcionado, se repite cientos o miles de veces. Los niños con X frágil son descendientes de portadores sanos; por tanto, los genes mutantes crecen de una generación a la siguiente.

Iteraciones génicas similares causan, se ha observado, la distrofia miotónica, forma común de distrofia muscular en adultos, y la atrofia muscular espinal y bulbar. Se ignora cuál sea el mecanismo de este explosivo cambio, aunque se sospecha de cierta forma aberrante de polimerasa, enzima que añade nucleótidos a la cadena de ADN que se está sintetizando.

La verdad es que hay muchas regiones repetidas en el genoma. ¿Por qué no se observa un crecimiento masivo parecido? David E. Housman, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, ha encontrado secuencias del genoma del ratón que aumentan y disminuyen de tamaño, aunque de forma menos espectacular que en el caso del *FMR-1*. Se ha esgrimido la idea de la inestabilidad de determinadas configuraciones del *FMR-1*, que predispondrían un crecimiento disparatado. En una o más generaciones, el alelo (una forma del gen) inestable crece hasta el tamaño que se observa en los portadores sanos del síndrome del X frágil. Cuando el gen alcanza una longitud crítica, se prima un desarrollo más espectacular, lo que sucede en los individuos afectados. Por razones que se nos escapan, el gen se dispara en individuos que han heredado el cromosoma X frágil de su madre. Habría primero un cambio de alelo estable a inestable.

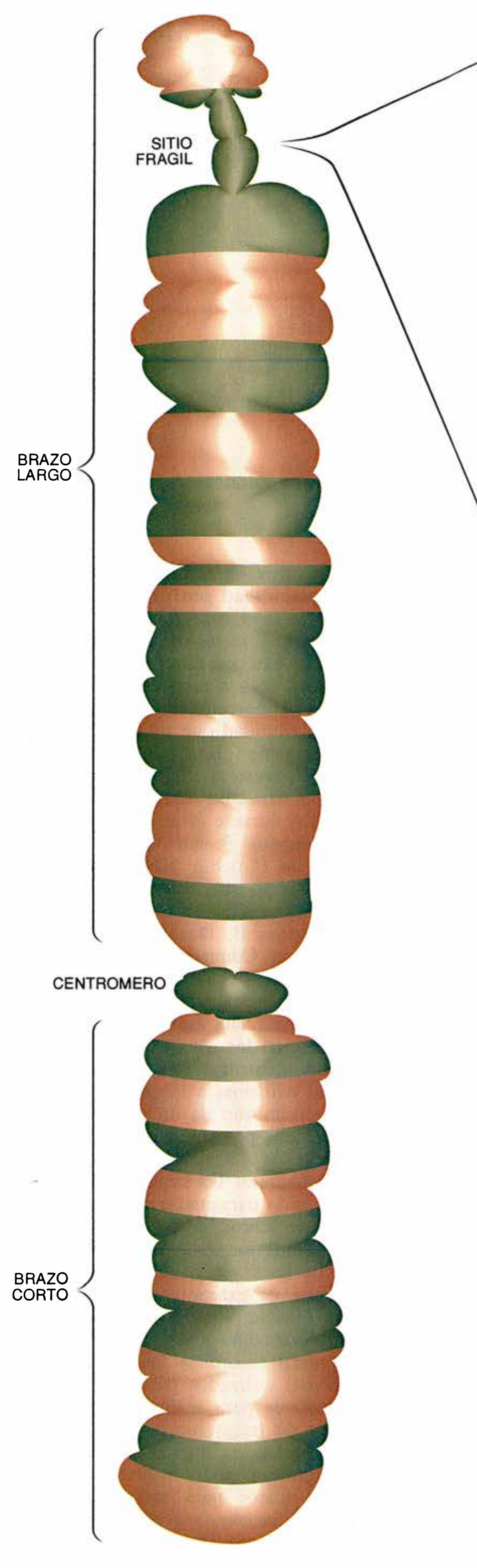
El fenómeno de crecimiento es el que nos retrotrae a la genética humana cuantitativa. La mayoría de las mutaciones alcanzan una frecuencia de equilibrio estable en las poblaciones a las pocas generaciones, ya que la selección las favorece o las elimina de forma proporcional a los efectos de la mutación. Pero la mutación de que estamos hablando no se deja sentir ni en la primera ni en la segunda generación, sino más adelante.

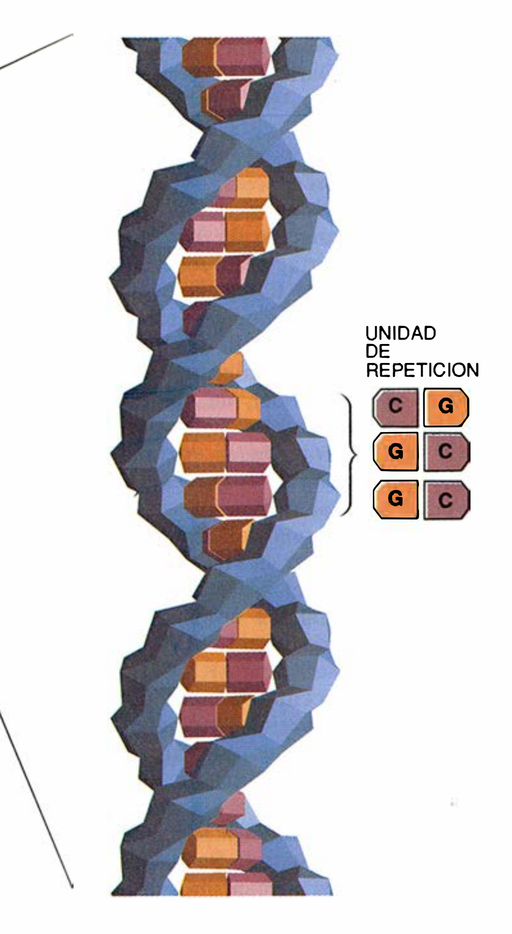
Las mutaciones que aumentan de tamaño podrían explicar el patrón peculiar de herencia que caracteriza al síndrome X frágil: la paradoja de Sherman. Según establece la genética clásica, cuando se trata de enfermedades ligadas al cromosoma X, deberían hallarse afectados todos los varones portadores del cromosoma X frágil; pero acontece que más del 20 por ciento son normales, ya que portan formas "premutadas" del *FMR-1*, más cortas. Sus hijos también son normales, porque sus genes crecen muy poco. Sin embargo, los nietos y nietas de los portadores originales suelen estar afectados, ya que las regiones repetidas de sus genes se han multiplicado sin tasa.

El patrón de crecimiento génico que se observa es suficiente para explicar la paradoja de Sherman. Aunque algunos sostienen que algo debe estar ocurriendo, pues no resulta fácil justificar que los principales cambios de las secuencias nucleotídicas se produzcan sólo en la línea germinal de la madre; se habla, a este respecto, de la posible implicación de otro fenómeno que viola el dogma genético tradicional: la impronta cromosómica dependiente del sexo.

Impronta génica

Dicta un principio fundamental de la genética mendeliana que el efecto ejercido por un gen no depende de su procedencia, paterna o materna.





5. CROMOSOMA X FRAGIL, así designado por una constricción cercana al extremo de su brazo largo. El sitio frágil tiene su origen en una extraña mutación que provoca el crecimiento desmesurado de las formas inestables del gen *FMR-1*. La región expandida contiene cientos o miles de repeticiones en tándem de una secuencia de tres nucleótidos específicos.

Pero se han hallado ejemplos claros en los que machos y hembras ejercen una impronta, o marca, sobre los genes que transmiten. Nos han demostrado los experimentos con ratones que los embriones portadores de un juego completo de cromosomas procedente de uno de los padres no llegan a desarrollarse, aunque sean genéticamante idénticos a un ratón normal. Sin la impronta materna en sus cromosomas, el embrión es anormal; sin la impronta paterna, la placenta no llega a desarrollarse.

En el hombre, los desequilibrios en los complementos de cromosomas con impronta materna y paterna suelen acabar en trastornos. Robert D. Nicholls ofrece pruebas interesantes de los efectos de la impronta genómica en dos enfermedades, al menos. Los niños con síndrome de Prader-Willi, que se caracterizan por presentar retraso mental y obesidad, parecen haber heredado las dos copias del cromosoma 15 de sus madres. A la inversa, niños a los que les faltan porciones de su cromosoma 15 materno (y cuyo cromosoma paterno está por tanto desproporcionalmente representado) presentan el retraso mental y los movimientos anormales típicos del síndrome de Angelman. Carmen Sapienza y otros asocian también casos de impronta anormal con cánceres infantiles.

No se conoce aún con certeza el mecanismo preciso de la impronta génica, pero el proceso puede implicar la metilación de ciertas citosinas, una de las bases del ADN. La metilación del ADN guarda relación, por lo que se ve, con la inactivación génica. Habida cuenta de que el patrón de metilación permanece durante la replicación del ADN, la impronta de un óvulo fecundado se transmite a todas las células del cuerpo.

Charles D. Laird sostiene que la clave de la paradoja de Sherman es la impronta del cromosoma X frágil, y no el crecimiento del gen. Ha desarrollado un modelo para explicar el comportamiento de la enfermedad, que mejora las conclusiones que se obtienen utilizando sólo datos moleculares. Se basa en la observación de las hembras; éstas poseen dos cromosomas X en cada célula e inactivan normalmente uno de ellos. Esta forma de impronta suele eliminarse del todo antes de que los cromosomas entren en meiosis, que es el proceso de división celular que origina los oocitos. En opinión de Laird, una mutación cromosómica en las portadoras del X frágil impide a veces borrar la impronta del sitio X frágil.

Síguese de ello que la mitad más o menos de los hijos de una mujer sana y portadora del defecto genético recibirán un cromosoma X parcialmente inactivado, aunque de manera permanente, y serán retrasados mentales. Algunas de sus hijas también recibirán un X frágil inactivo, y también quedarán afectadas. Desde el punto de vista de Laird, las mutaciones de crecimiento sólo serían efectos secundarios de la impronta inactivadora en el sitio frágil.

Mutaciones dirigidas

La genética molecular anda también revuelta por una polémica de largo alcance, que tiene que ver con los efectos del ambiente sobre el genoma. Se sabe que las radiaciones, los productos químicos carcinogénicos y otros agentes provocan mutaciones aleatorias. Se investiga, ahora, si el estrés del entorno puede dirigir el tipo de mutaciones que se producen. No todos están de acuerdo en despertar los viejos fantasmas de la evolución lamarckista, las mutaciones intencionadas y la herencia de los caracteres adquiridos.

La idea de que el medio configurara la herencia cayó en las postrimerías del siglo pasado con la distinción y separación entre células de la línea germinal, formadora de ovocitos y espermatocitos, y células somáticas (cuerpo). Las células del sistema inmune y otros tejidos pueden cambiar sus genes en respuesta al ambiente, pero no así las células germinales. Pero en biología las generalizaciones son arriesgadas. Y así suele olvidarse que la mayoría de los organismos no secuestran sus células germinales: los tejidos sexuales de las flores, por ejemplo, se producen a partir de células somáticas normales; más palmaria, si cabe, resulta la inaplicabilidad de esa doctrina a los organismos unicelulares. Estas excepciones abren la posibilidad de que, al menos en algunas especies, los cambios genéticos que favorezcan la supervivencia puedan ser inmediatamente transmitidos a la siguiente generación. Desde una perspectiva teleológica, los organismos mutarían para adaptarse mejor al ambiente.

El debate en torno a las mutaciones dirigidas arranca de 1988, con la publicación de un artículo de John Cairns, adscrito entonces a la Escuela de Salud Pública de Harvard. Movido por su interés hacia la mutagénesis, decidió reexaminar el principio genético según el cual las mutaciones favorables para la supervivencia no son más probables que las desfavorables. Cultivó bacterias en un medio donde escaseaba el único azúcar que ellas podían metabolizar, si bien abundaba otro azúcar, la lactosa. El resultado del experimento le llevó a pensar que las mutaciones que reactivaban el gen bacteriano defectuoso necesario para utilizar la lactosa ocurrían con una frecuencia mayor de lo que cabría esperar por puro azar. Las fuerzas selectivas no se limitaban a cribar los organismos menos adaptados, sino que conducían de forma activa las mutaciones en una dirección beneficiosa.

Unos meses después, Barry G. Hall, hoy en la Universidad de Rochester, presentó pruebas más convicentes de mutaciones inducidas por la selección. Realizó experimentos similares, en los que las bacterias hambrientas necesitaban dos mutaciones independientes —ninguna de las cuales parecía conferir por sí sola beneficio— para utilizar una nueva fuente de alimento. Hall calculó que la probabilidad de que ocurrieran las dos mutaciones de forma espontánea era

bajísima. Halló, sin embargo, que un número altísimo de bacterias había conseguido adaptarse al ambiente. Muchos otros confirman haber observado mutaciones inducidas por la selección en bacterias. El pasado verano, Hall anunció que lo había comprobado también en levaduras.

Pero se desconoce la naturaleza del mecanismo; a lo más, se rechaza la propuesta de Cairns de que la retrotranscriptasa podría transcribir la información correspondiente a las mutaciones beneficiosas desde ARN anormal hacia ADN bacteriano. Más plausible parecía el mecanismo defendido en el modelo de la mutagénesis transcripcional; de acuerdo con el mismo, el ADN de los genes activos sufre mutaciones rapidísimas por hallarse durante la transcripción en forma unicatenaria, más vulnerable. Pero tampoco la experimentación lo respalda. Se han propuesto más ideas. El propio Hall piensa que aún es válida su hipótesis de que, en una población sometida a estrés, una pequeña porción de la misma puede entrar en un estado hipermutable. Sólo las células hipermutables que adquieran una mutación beneficiosa sobrevivirán; las otras no serán viables.

Con independencia de cuán razonables puedan parecer esos hipotéticos mecanismos, muchos dudan de la existencia de las mutaciones dirigidas. Milita en esa tendencia Richard E. Lenski, de la Universidad estatal de Michigan. Los experimentos esgrimidos, aduce, carecen de los controles suficientes, además de resultar complicado calcular el número de mutaciones responsables de una población observada. Los fenómenos bioquímicos pueden sesgar la tasa de mutación y crear la ilusión de las mutaciones dirigidas. Ello no le impide alabar el trabajo que se está realizando. "Parece observarse, en algunos casos, un incremento en la tasa de mutación cuando las células están sometidas a situaciones de estrés", reconoce; "no se trata de ninguna mutación dirigida, como se asegura, sino de una dependencia fisiólogica de ciertas tasas de mutación".

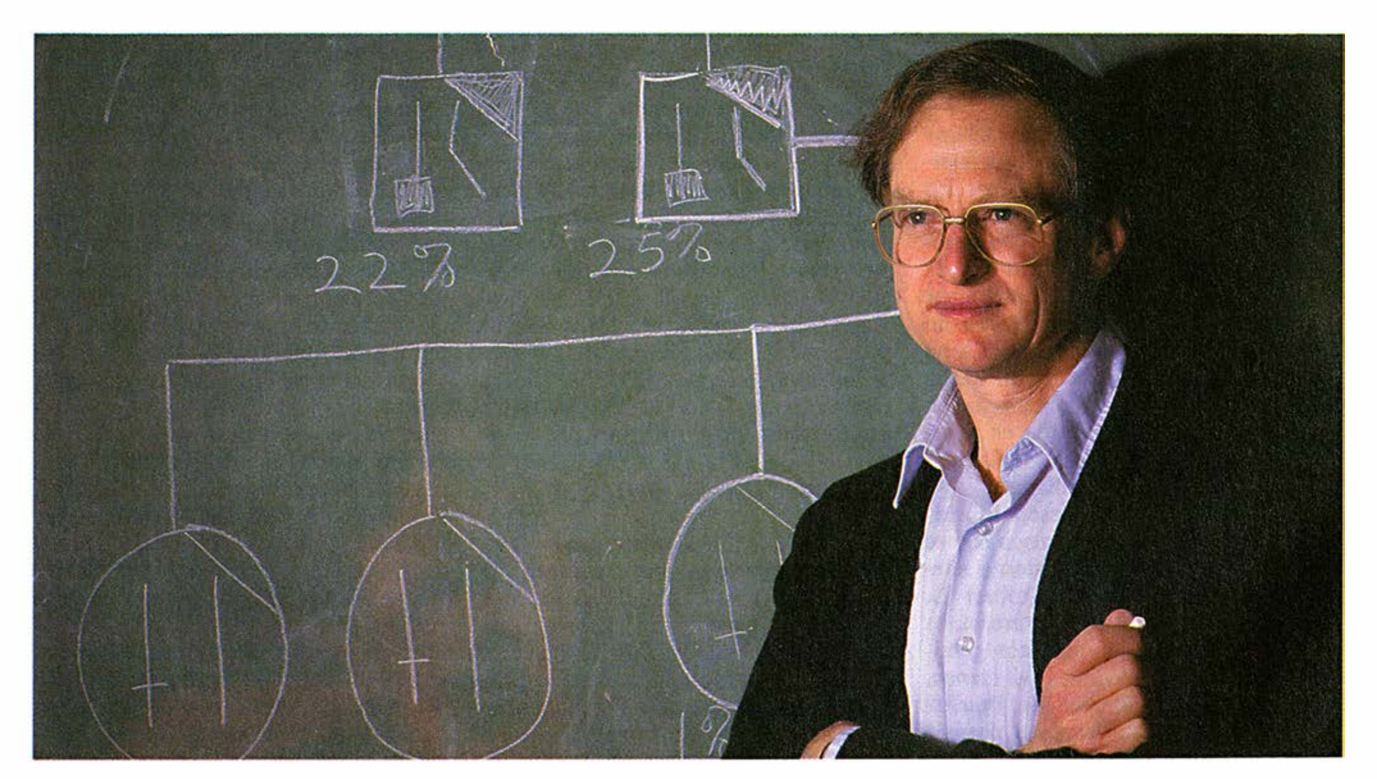
Revisión de estilo del ARN

Los nuevos tipos de mutaciones no son los únicos reponsables de las capas de complejidad que se van añadiendo a la genética molecular. Hemos de traer a colación ciertos descubrimientos relativos a la transcripción y traducción de los mensajes genéticos en proteínas. Las moléculas de ARN transcritas a partir del ADN deben sufrir a veces importantes modificaciones antes de convertirse en mensajeras para la síntesis de proteínas.

Las instruccciones para fabricar una proteína, presentes en el trascrito primario de ARN, están interrumpidas por largas secuencias que no significan nada. Durante el proceso de maduración del ARN, estas secuencias, o "intrones", son eliminadas de la molécula, y se empalman los "exones", o secuencias portadoras de sentido, en un proceso que termina con la formación de una molécula final más corta, pero coherente. En 1982, Thomas R. Cech, de la Universidad de Colorado, y Sidney Altman, de la Universidad de Yale, realizaron el descubrimiento, que mereció el premio Nobel, de que algunas secuencias intrónicas de ciertos ARN tenían propiedades enzimáticas que permitían al propio ARN autocortarse y empalmarse.

Quizá la manera más extraordinaria de maduración sea la revisión de estilo o corrección del ARN, proceso en el que la información crucial que no está especificada en el ADN se añade en la molécula del ARN. Con la expresión "corrección de estilo del ARN" se designan varios fenómenos diferentes. En todas sus formas, la corrección del ARN implica la adición específica de bases a las moléculas de ARN, o la modificación de ciertas bases ya presentes. Se hallan implicados distintos mecanismos utilizado para ello.

El caso mejor conocido de corrección de ARN, y posiblemente el más sorprendente, es el estudiado en los parásitos tripanosomas, causantes de la enfermedad del sueño. El ADN



6. UN TEORICO DE LA IMPRONTA, Charles D. Laird, de la Universidad de Washington, atribuye el extraño comportamiento genético del síndrome del X frágil a la impronta química dejada en los cromosomas por los padres del organismo afectado.

mitocondrial de los tripanosomas posee una estructura singular. Consta de varias docenas de grandes lazos, o maxicírculos, y miles de otros menores, o minicírculos. Todos ellos se organizan en una estructura semejante a una cota de mallas.

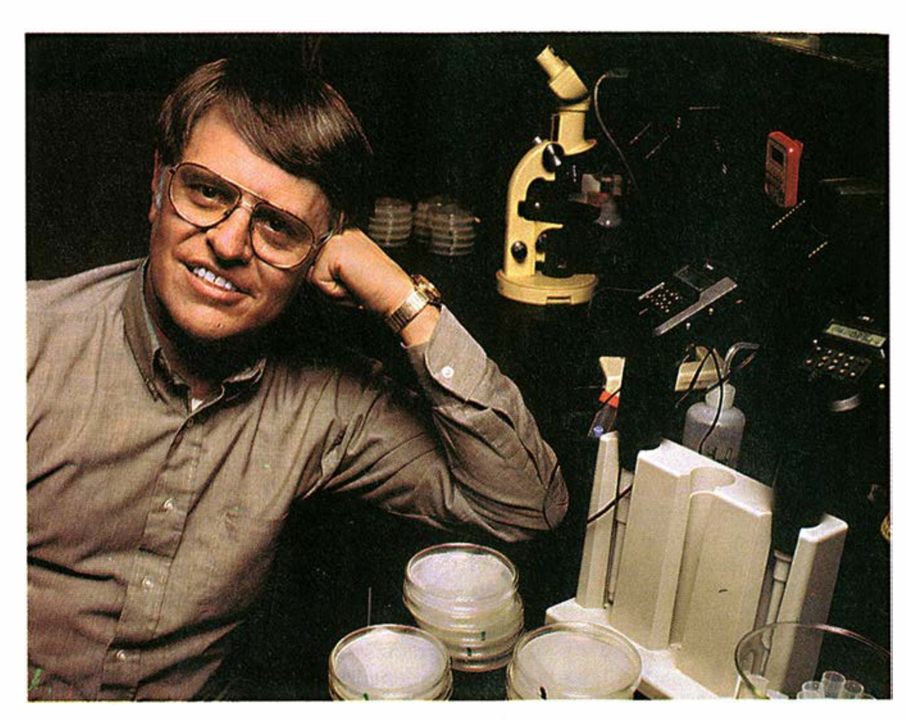
Las peculiaridades de este ADN no terminan en su estructura. Según parece, el ADN de los minicírculos no tiene información genética útil. Los maxicírculos portan la mayoría de los genes que se encuentran normalmente en las mitocondrias de otros organismos. Faltan, sin embargo, genes cruciales, como los que cifran la información para los ARN transferentes.

La sorpresa llegó con la investigación pormenorizada de la estructura del ARN mensajero. En muchos casos, la molécula resultaba más larga que el ADN del que habíase transcrito. La longitud de una cadena de ARN doblaba su correspondiente ADN. Se habían añadido estratégicamente algunas uridinas al ARN, dándole sentido a lo que en el ADN no eran sino "criptogenes" sin sentido, un término acuñado por Larry Simpson, de la Universidad de California en Los Angeles.

En 1990, Simpson, Beat Blum y Norbert Bakalara propusieron un mecanismo en el que los maxicírculos y minicírculos producen pequeños "ARN guías", que buscan omisiones en los ARN mensajeros y las corrigen. El ARN guía y la cadena de mensajero a la que se ancla encajan uno en otro como las dos mitades complementarias de una cremallera. Allí donde falta una uridina en el ARN mensajero se produce una distorsión en el alineamiento. Ese desemparejamiento provoca la introducción de una uridina en la secuencia del ARN mensajero. El proceso de corrección del ARN crea la secuencia de ARN mensajero madura.

Desconocemos las causas por las que ha evolucionado un sistema con esas características. Podríamos suponer que ello proporciona a los parásitos cierto control sobre la expresión de genes durante diferentes momentos de sus ciclos de vida. Se ignora de qué modo el ARN guía dispone los cortes y empalmes durante el proceso de corrección. Un modelo, publicado por Cech, e independientemente propuesto también por Blum y Simpson, sostiene que los ARN guías pueden llevar a cabo ellos mismos la operación, donando uridinas de sus propias cadenas.

Tras los cortes y empalmes, correcciones y demás, el proceso de maduración termina y el ARN mensajero está listo para su traducción en proteína por los ribosomas. Incluso esta etapa encierra mayor complejidad de la imaginada. Para llevar a cabo la traducción, el ribosoma debe descifrar la información presente en el ARN. Cada codón, o secuencia de tres bases en el ARN, se corresponde con una instrucción: añadir determinado aminoácido o detener la síntesis de la proteína.



7. EXPERTO EN MUTAGENESIS, Barry G. Halls, de la Universidad de Rochester, opina que el estrés ambiental puede a veces dirigir la evolución, y no sólo estimularla. Los organismos unicelulares muestran su preferencia a mutar en un sentido beneficioso.

Un código no tan universal

Diríase que un código genético fundamental para la vida debe ser universal. Pero no lo es. El código utilizado para decifrar el ARN procedente del núcleo difiere ligeramente del que se emplea para el ARN de mitocondrias y cloroplastos. En el ARN mitocondrial, por ejemplo, el codón uridina-guanina-adenina es una instrucción para añadir el aminoácido triptófano a la cadena polipeptídica que se está formando; en el ARN nuclear, una señal de terminación de la síntesis de proteínas.

Muchos experimentos han demostrado que los códigos a veces son flexibles. Para sintetizar algunas proteínas, el ribosoma debe alterar la traducción de codones en la cadena del ARN mensajero. Se ha demostrado que los ribosomas que sintetizan determinada proteína de la sangre de mamíferos interpretan un codón terminador —aunque no todos— como una instrucción para añadir el aminoácido selenocisteína.

No siempre se leen los codones en secuencia lineal. Los ribosomas pueden "cambiar de fase", saltando hacia delante o hacia detrás una o más bases hasta encontrar un determinado codón. En un caso identificado por Wai Mun Huang, del Hospital Clínico de la Universidad de Utah, los ribosomas ignoran una secuencia de 50 bases del ARN mensajero. John F. Atkins, del Colegio Universitario de Cork, ha propuesto la expresión "recodificación del ARN" para esta reinterpretación del ARN mensajero por los ribosomas.

La recodificación del ARN y la maduración, la impronta genómica de los cromosomas y todas las nuevas mutaciones son sólo algunos de los fenómenos que animan hoy día la genética molecular. Esta nueva imagen que se atisba de un genoma dinámico no menoscaba en modo alguno el modelo tradicional, un notable logro intelectual por otra parte. Las reglas establecidas por los genéticos son aplicables a la herencia de los caracteres en organismos tan diversos como bacterias, rosas, jirafas y el propio hombre. En su sencillez reside la fuerza de la genética tradicional. Sus generalizaciones describen la mayoría de los fenómenos genéticos en la mayoría de los organismos, la mayoría de las veces. Queda el gran desafío de explorar las implicaciones de las excepciones y encontrar nuevas reglas más eficaces, si es que existen.

Ciencia y empresa

Conversando con el ordenador

Reconocimiento automático del habla

Uno de los más importantes retos que tiene planteados el sector informático en esta década es el de lograr una comunicación "natural" entre el hombre y el ordenador. Son muchos los investigadores que, en todo el mundo, trabajan preparando el terreno para el diálogo real entre usuario y máquina. Si la forma habitual que las personas utilizan para comunicarse es su propia lengua (la llamada "lengua natural"), ¿por qué no hacer que los ordenadores sean también capaces de entenderla? Así, la interacción con la máquina sería más sencilla, estaría al alcance de un número mayor de usuarios y se evitaría, en muchos casos, la necesidad de aprender complejos códigos y engorrosos lenguajes de programación.

Si bien es cierto que aún nos encontramos lejos de esos robots parlantes de las novelas futuristas y de las películas de fantasía científica, ya van existiendo herramientas que incorporan ciertos rasgos de la lengua natural a las aplicaciones y procesos informáticos tradicionales.

Un proyecto general sobre "La Tecnología de la Lengua" habrá de proponerse el tratamiento de la lengua natural por medio del ordenador. Su fin último sería hacer que éste entendiera, generara o tradujera lenguas naturales, para responder en consecuencia a las órdenes y preguntas del sujeto usuario. Habría de trabajar, pues, en el desarrollo de modelos computacionales y formalismos en morfología, lexicografía, sintaxis, semántica y pragmática; en la creación de interfases en lengua natural y de herramientas informáticas de ayuda a la escritura, la traducción, la realización automática de resúmenes, la enseñanza y el aprendizaje; en aplicaciones en recuperación de información, generación de textos y traducción automática, y en el desarrollo de sistemas de reconocimiento y síntesis del habla.

El Centro de Tecnología de la Lengua (CTL) de IBM viene trabajando en algunos de estos apartados desde hace varios años. En particular, y desde el año 1990, en la preparación de un sistema de reconocimiento del habla para el castellano, proyecto realizado en colaboración con otros países europeos y con el Centro de Investigación T. J. Watson de IBM en Hawthorne (Nueva York), que cuenta con 20 años de experiencia en este campo y dispone de uno de los sistemas más potentes.

El reconocimiento del habla se propone, en definitiva, la conversión fluida con el ordenador, como si se tratara de un sujeto humano más. A pesar de los enormes progresos conseguidos en los últimos años, ese momento está todavía lejos, pero gracias tanto a la potencia de los ordenadores como a la mejora de los algoritmos, existen hoy ya algunos sistemas comercializados y otras aplicaciones que estarán disponibles en un corto plazo.

Hagamos un breve repaso. Contamos ya con sistemas que reconocen palabras de un vocabulario reducido pronunciadas por cualquier locutor a través de la línea telefónica. Pueden utilizarse para la realización de consultas sobre datos bancarios, en sistemas de información municipales o turísticos limitados, en la realización de reservas de viajes y hoteles, o en la transferencia de llamadas telefónicas, por ejemplo. En este caso, el usuario no necesita un terminal informático, sino simplemente el aparato telefónico; los sistemas se combinan con sintetizadores de voz, para responder oralmente a las peticiones.

No tardaremos mucho en disponer de ciertas aplicaciones relativas al control de procesos y la introducción de comandos mediante voz, en casos en que las manos o la vista del operador están constantemente ocupados (manejo de maquinaria, de aviones, etc.). Mayor complejidad revestirá la entrada oral de datos o el dictado de informes que permitan operar con el ordenador sin necesidad de utilizar las manos o en circunstancias de baja iluminación (trabajo en cámaras oscuras). Se prevé, por fin, amplio uso del reconocimiento del habla en ciertas minusvalías; pensemos, por ejemplo, en el caso de sordos y de personas con discapacidad en las extremidades superiores. A más largo plazo, el sistema capaz de reconocer el habla continua, tal y como los humanos lo hacen habitualmente, podrá realizar el subtitulado automático de programas o emisiones de televisión, servicios de interpretación y traducción simultánea aplicable a consultas telefónicas, videoconferencias o conversaciones, etc.

Pero son muchas las dificultades que hay que resolver para construir un sistema de reconocimiento del habla. El propio mecanismo humano de reconocimiento, extraordinariamente complejo, dista mucho de conocerse bien; y la facilidad con que los humanos entendemos el habla no invita precisamente a ponderar los problemas que ello supone para una máquina. Pensemos, sin embargo, en las dificultades que conlleva el aprendizaje y comprensión de una lengua extranjera, para hacernos una idea más cabal de la cuestión.

Los problemas principales con los que hay que enfrentarse en el reconocimiento del habla son de distinto tenor. Unos afectan al tamaño del vocabulario: cuantas más palabras se desea reconocer, más complejo es el sistema, pues aumentan las posibilidades de ambigüedad y confusión y el tiempo de proceso necesario; es decir, es mucho más sencillo desarrollar un reconocedor para unas pocas palabras que para un vocabulario grande, de varias decenas de miles de palabras, que dé al usuario la impresión de ser ilimitado, de que puede utilizar virtualmente cualquier palabra y expresión que desee.

Otros problemas tienen que ver con el tipo de habla. Al emitir un sonido, éste se halla condicionado por los sonidos circundantes (coarticulación); en el habla continua, las fronteras entre las palabras no suelen mostrarse tajantes, por lo que se producen más confusiones entre ellas. El habla discreta, donde las palabras se pronuncian de forma aislada, es, en consecuencia, más fácil de reconocer que el discurso continuo, sin pausas entre palabras.

Importa también la dependencia del locutor. Un sistema dependiente del locutor necesita un entrenamiento con cada nueva voz para adaptarse a sus características. Compensa los inconvenientes del aprendizaje con la exactitud obtenida en el reconocimiento. Los sistemas independientes del locutor presentan mayores dificultades, al tener que trabajar con diversos modelos de voces y acentos.

Otra fuente de dificultad reside en los rasgos propios del emisor y en las características de la transmisión.

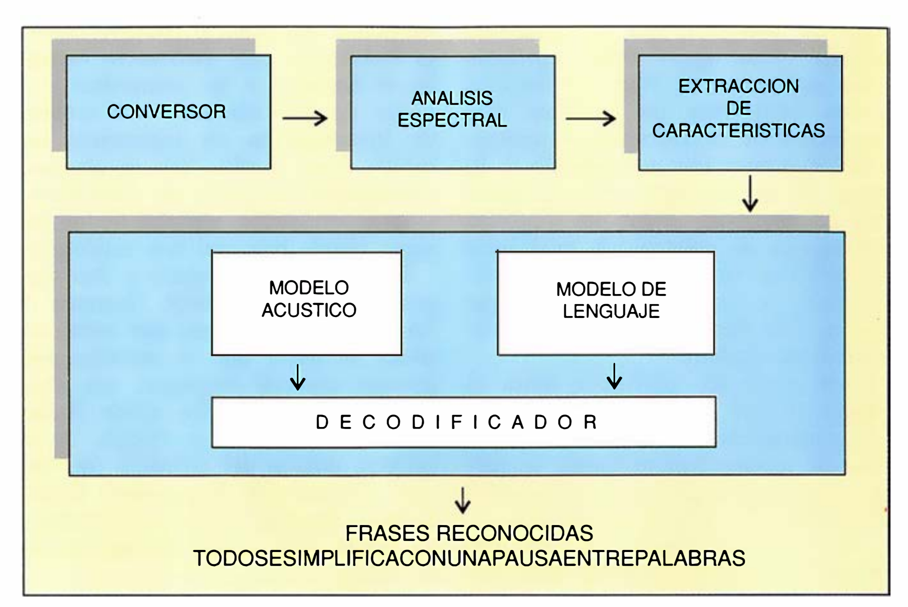
Cualquier variación en el volumen, velocidad, énfasis o claridad del hablante puede influir negativamente en el reconocimiento. Los ruidos ambientales, las conversaciones cruzadas, el micrófono o la peor calidad del sonido en caso de transmisión a través de la línea telefónica son otras tantas circunstancias que limitan la claridad e inteligibilidad del habla.

El proyecto Tangora/E, del Centro de Tecnología de la Lengua de IBM, se propone desarrollar un sistema capaz de transcribir por escrito las palabras enunciadas oralmente por distintos locutores humanos, es decir, un sistema de dictado automático, lo que podríamos llamar una "máquina de escribir sin teclado".

El sistema reconoce ya 20.000 palabras pronunciadas de forma aislada. Es decir, es necesario hablar con pausas entre las palabras, pero bastan unos 4 centisegundos de pausa, por lo que el proceso de coarticulación no desaparece por completo y se puede mantener una entonación "casi" normal. Con 20.000 palabras se cubre más del 97 % de un texto perteneciente a un dominio determinado de especialidad. (Por "palabra" entendemos aquí forma de palabra, no lema; es decir, las distintas formas flexionadas correspondientes a un determinado lema son palabras diferentes para nuestro sistema.) El reconocimiento se lleva a cabo en tiempo real, con un retardo de unos pocos segundos, necesarios para verificar las distintas hipótesis de palabras y secuencias de palabras.

Tangora/E es dependiente del locutor. Vale decir, necesita un entrenamiento para cada nuevo usuario que desea ser reconocido por el sistema. Este se lleva a cabo leyendo un texto preparado de antemano y exige que se pronuncien todos los fonemas un número suficiente de veces en distintos contextos fonéticos. En esta fase se invierten unos 20 minutos por término medio.

El sistema se basa en métodos probabilísticos, partiendo de la suposición de que el habla se puede modelizar estadísticamente a partir del examen de un conjunto significativo de datos de entrenamiento. El formalismo utilizado es el de los modelos ocultos de Markov ("Hidden Markov Models"), caracterizados por dos elementos básicos: un conjunto de estados conectados mediante secuencias de transiciones y un conjunto de distribuciones de probabilidad en cada estado. Basado en esta técnica se elabora el modelo acústico, que se utilizará posteriormente en el proceso de reconocimiento.



Reconocimiento del habla.

El modelo acústico se genera de acuerdo con la pronunciación real de las palabras del vocabulario, partiendo del procesamiento de las grabaciones de las voces de diversos locutores que enuncian varias veces cada palabra. Para el español, hemos utilizado diez voces masculinas, con pronunciación uniforme, pero con distintos tonos. En realidad, nuestros locutores han leído el texto de entrenamiento y sólo 6000 palabras del vocabulario, el correspondiente a una versión anterior del actual reconocedor. A partir de esa información acústica, y gracias al inventario de alófonos resultante, hemos desarrollado herramientas que nos permiten sintetizar los modelos acústicos de las nuevas palabras de forma automática, sin necesidad de grabaciones, con el consiguiente ahorro de tiempo, mayor flexibilidad frente a ampliaciones y modificaciones del vocabulario, y sin merma del rendimiento.

Por otro lado se utiliza el "modelo de lenguaje", que es también probabilístico. Este modelo asigna probabilidades a las secuencias de palabras; codifica, pues, la información lingüística que utiliza el sistema. Contiene probabilidades de transición entre palabras; en nuestro caso se utilizan trigramas, por lo que la probabilidad de una palabra viene condicionada por las dos palabras precedentes. Estas probabilidades se deben extraer del tratamiento estadístico de un cuerpo textual muy voluminoso, en relación directa con el vocabulario de la aplicación. Nuestro sistema dispone ya de un *corpus* que supera los 100 millones de palabras, compuesto fundamentalmente por texto periodístico, novela contemporánea y fragmentos de historia y medicina.

El proceso global que se sigue, en gran medida probabilístico, estima cuál es la secuencia más probable de palabras pronunciadas por el locutor a partir de la probabilidad individual de que cada palabra del vocabulario haya sido pronunciada y de la probabilidad de ocurrencia de una secuencia de palabras determinada.

En resumen, pues, Tangora/E opera como sigue: una vez filtrada, muestreada y normalizada la señal de entrada correspondiente a la emisión del locutor, tras su recepción por el micrófono, se obtiene una sucesión de valores numéricos. La primera fase, de selección rápida, rastrea todas las palabras del vocabulario del sistema y obtiene una lista de palabras candidatas. Para facilitar esa labor de comparación, se han creado modelos de las palabras en secuencias de fonos, que tienen la apariencia de una transcripción fonética. Los fonos están también representados mediante modelos ocultos de Markov, y corresponden a los fonemas y alófonos de la lengua. Se han definido 51 fonos para el español.

La segunda fase aplica la información del modelo de lenguaje, asignando probabilidades a secuencias de palabras, independientemente del proceso acústico. Así se reduce la lista de palabras obtenidas por la fase anterior, seleccionándose las secuencias de candidatos más probables.

La última fase, de selección detallada, aplica las probabilidades contenidas en el modelo acústico antes mencionado. Es más caro, en térmi-

nos de cómputo, que la selección rápida, pero opera sobre hipótesis más probables. Al final, se escogen como definitivas las palabras más probables de acuerdo con la puntuación que han ido acumulando a lo largo de las tres fases. Por supuesto, no se examinan todas las posibles secuencias de palabras, lo cual sería prohibitivo, sino que, a lo largo del proceso, se van descartando las que tienen una puntuación inferior a determinado umbral.

Los resultados obtenidos hasta el momento con nuestro prototipo son extraordinariamente positivos, ya que la tasa de reconocimiento supera en media el 96 % de aciertos en las pruebas realizadas con distintos locutores.

Para que un sistema de este tipo llegue a la comprensión de cualquier locutor, que hable de forma natural y espontánea (y, por tanto, no necesariamente gramatical, como suelen hacerlo las personas, lo que no impide la comprensión), con un gran vocabulario (más de 50.000 palabras) y en unas condiciones ambientales de ruido y conversaciones cruzadas, se requerirán muchos años de trabajo e investigación. Pero el reconocimiento del habla y, en general, la técnica de la lengua, están dando ya hoy sus frutos y pronto veremos sus resultados en numerosos programas de ordenador. (Luis de Sopeña, IBM Madrid.)

Tecnología de altura

¿La industria por fin en el espacio?

El uso de la navegación espacial para la experimentación científica es tan antiguo como los propios lanzamientos de satélites y sondas, tripulados o no. Se inició con los primeros satélites rusos y americanos, y prosiguió con los satélites europeos, chinos, indios o japoneses. Ejemplo reciente es el embarque en la nave *Columbia,* que transporta el laboratorio europeo *Spacelab,* de dos experimentos sobre materiales sometidos a microgravedad preparados en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de Madrid. Sin embargo, debe señalarse inmediatamente que hasta el momento la experimentación espacial se mantiene en un terreno demostrativo y apenas ha incidido en el ámbito de la industria privada.

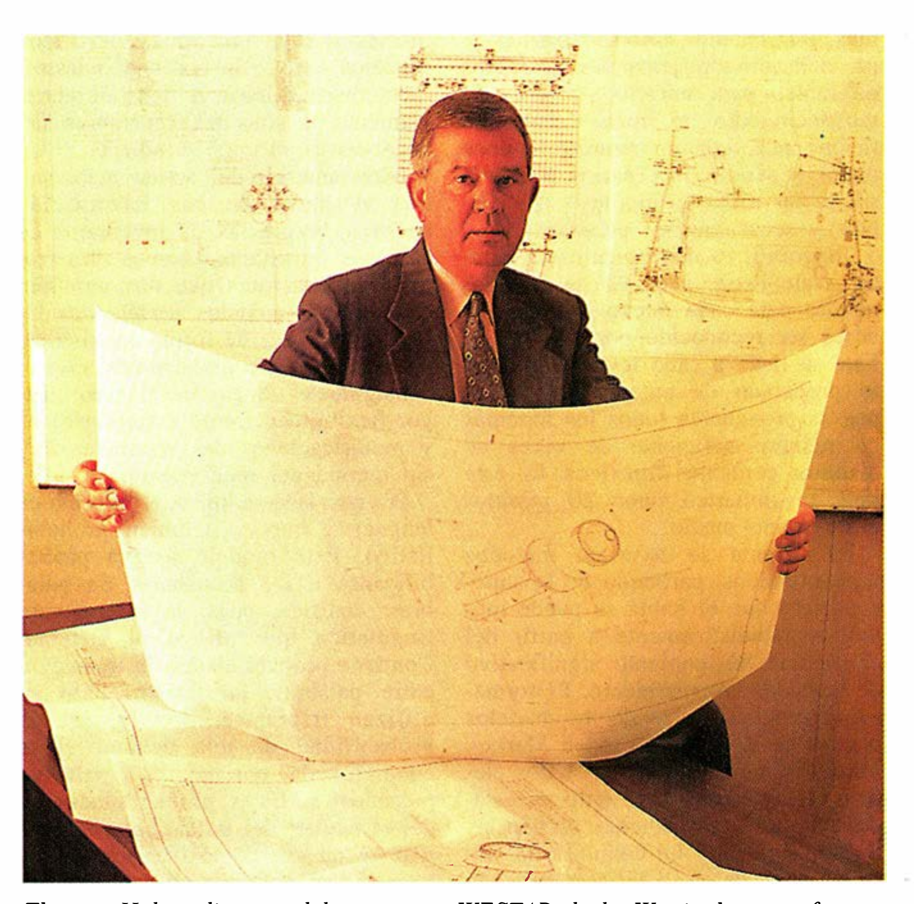
En los Estados Unidos, donde podría esperarse una fuerte participación empresarial en esta actividad, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) intenta convencer, con insistencia rayana en el fastidio, a las compañías privadas de que añadan a sus medios de investigación un laboratorio en órbita. Pese a ello, las inversiones conseguidas no pasan de simbólicas, y la investigación espacial comercial sigue siendo hoy casi una entelequia.

En éstas, Westinghouse y dos empresas asociadas (EER Systems y Space Industries) creen que serán capaces de hacer que la investigación privada espacial despegue, con algo más que una pequeña ayuda financiera por parte de la NASA. A la primera misión del COMET (del inglés *Commercial Experiment Transporter*) seguirán once experimentos en órbita baja, a 550 kilómetros de la Tierra.

Westinghouse espera avivar la demanda de la industria mediante esta estrategia comercial, no demasiado costosa, de alquilar plaza en un vehículo espacial. Gran parte de los 32 lanzamientos comerciales realizados por los Estados Unidos desde 1982 han colocado en órbita satélites de comunicaciones; en esas misiones habían los investigadores de aportar su propia estación terrestre y ocuparse por sí mismos de innumerables detalles de planificación. Westinghouse ha establecido un programa de lanzamiento independiente —el WESTAR, o Servicio Westinghouse de Transporte Espacial— que ofrece a cualquier interesado, por 35 millones de dólares, un paquete completo de servicios. En palabras de Thomas E. Haley, director del programa WESTAR, "en esta tienda se compra todo a la vez; nos encargamos del lanzamiento, la puesta en órbita y la recuperación".

Por mucho que se hable del sector privado, lo cierto es que la NASA va a correr con 85 de los 100 a 200 millones que se prevé costarán tres lanzamientos del COMET, aparte de financiar los gastos que supone el llevar los experimentos a bordo del vehículo espacial. Es evidente que sin su apoyo no se habría emprendido el programa.

Los 205 kilogramos de carga útil que suman los once experimentos del primer vuelo del COMET han sido asignados a los centros de desarrollo comercial del espacio. Estas instituciones, la mayor parte de ellas vin-



Thomas Haley, director del programa WESTAR de la Westinghouse, ofrece a la industria, la administración pública y las instituciones académicas la posibilidad de llevar a cabo experimentos en órbitas de poca altura alrededor de la Tierra.

culadas a universidades, fueron creadas, en 1985 la primera, por la oficina de programas comerciales de la NASA, y todavía dependen de ésta como fuente primordial de financiación. (El Spacehab, módulo experimental de construcción privada que volará en el transbordador espacial, sigue un modelo semejante. Se han programado ocho vuelos a intervalos de seis meses).

Entre los experimentos asignados al COMET figura uno sobre crecimiento de cristales de proteínas —en el que participan Eli Lilly, Du Pont y Merck—, y unas pruebas de telecomunicaciones de Motorola, firma que, por mediación del centro de comercialización del espacio de la Universidad Atlántica de Florida, participa en experimentos encaminados a determinar los requisitos técnicos del elemento en órbita baja de una red telefónica celular mundial.

El COMET ha de ofrecer una exposición a la microgravedad mucho más prolongada que la prestada por el transbordador espacial o cualquier otro servicio de lanzamiento comercial de los Estados Unidos. Las anteriores misiones norteamericanas con cohetes desechables solamente permitían unos minutos de microgravedad. La cápsula, proyectada por los pioneros espaciales Max Faget y C. C. Johnson, de Space Industries, usa una técnica probada a lo largo de 30 años, y recuerda las cápsulas tripuladas de los programas *Mercury* y *Gemini*.

El módulo de servicio desechable fue construido por Westinghouse; contendrá cuatro de los once experimentos, y se mantendrá dos años en órbita. Ambas cápsulas serán lanzadas por un cohete Conestoga 1620 suministrado por EER, la empresa que construyó la rampa de Wallops Island. EER proporciona también motores y componentes, y monta los referidos cohetes.

Apenas faltaba un mes para la fecha de lanzamiento tentativamente fijada, y WESTAR todavía buscaba comprador para 50 kilogramos extra de carga útil; los experimentos que los aprovechasen habrían de estar enteramente financiados por empresas, universidades u organismos del gobierno. Según Haley, para el otoño de 1994 se podría programar un vuelo WESTAR independiente, aunque muchos, si no todos los experimentos corrieran a cargo del Departamento de Defensa u otra agencia federal. "La industria y las universidades sienten interés, pero no están listas todavía", dice.

En realidad, pocos son hoy día los convencidos de que sea rentable investigar en condiciones de microgravedad el crecimiento de cristales o proteínas con fines farmacéuticos, o de materiales semiconductores para la electrónica. Tras diez años de experimentos, sólo algo más de uno de cada cinco cristales de proteínas producidos en el espacio aventaja a los obtenidos en laboratorios terrestres, según un reciente artículo de *Nature*.

Un informe del Consejo Nacional de Investigación observaba que el "celo" de la NASA por estimular el uso comercial del espacio podría dar lugar a experimentos industriales de poca calidad, en los que se prescindiese del rigor con que las investigaciones universitarias son examinadas. Robert F. Sekerka, profesor de física de la Universidad Carnegie Mellon, califica de oportunista la participación industrial en este programa: "Si el gobierno no pusiese el dinero y la industria pagase el flete entero, ¿cuánto pondrían? La respuesta, seguramente, sería: nada."

WESTAR, sin embargo, espera que, si el precio es adecuado, la industria y las universidades se subirán finalmente a bordo. Proyectan pedir un millón de dólares por una carga útil de cinco kilogramos metida con calzador entre otros experimentos, que, con todo, es suficiente para un pequeño experimento de desarrollo de proteínas. Según Haley, la posibilidad de repetir las pruebas a intervalos previsibles tal vez permita descubrir las aplicaciones óptimas de la microgravedad.

Si tuviese éxito, WESTAR, predice Haley, podría llegar a realizar hasta 10 misiones por año a fines de siglo, a medida que el costo vaya cayendo de manera constante. "Muchos científicos desearían poner algo en órbita en enero, recuperarlo, modificarlo y volver a lanzarlo en agosto para observar el efecto del cambio de parámetros; se ahorrarían así años de experimentación en tierra."

Virus virtuosos

Agentes patógenos alistados contra el cáncer

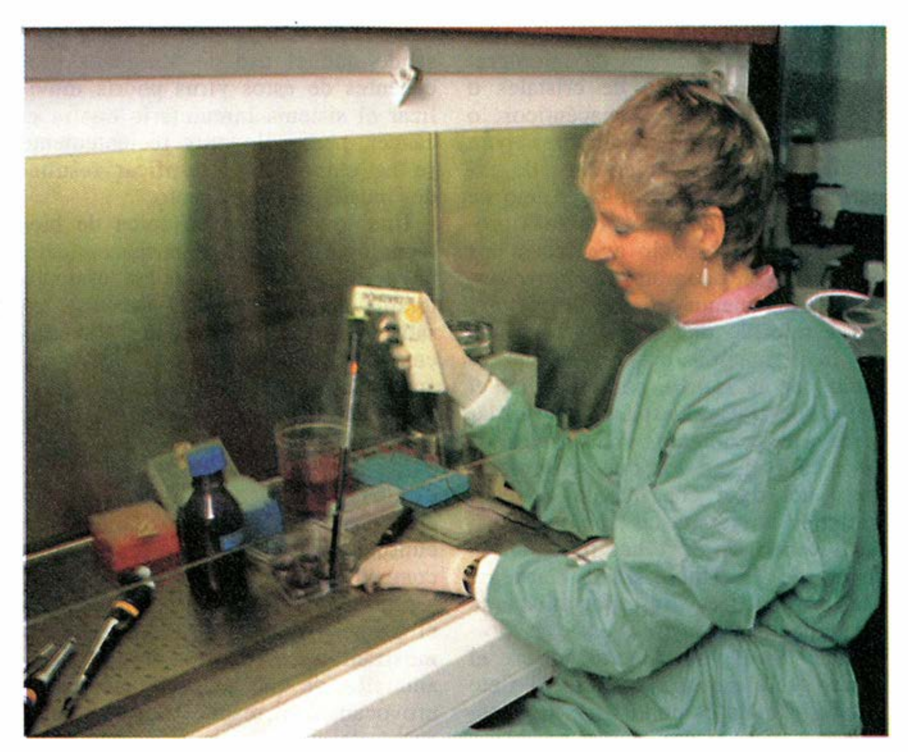
Según los cálculos actuales, un quinto de los cánceres provienen, al menos en parte, de infecciones víricas crónicas. Virus convictos de producirlos son el de la leucemia/linfoma de la célula *T* humana, el del papiloma humano, el de la hepatitis B y del síndrome de Epstein-Barr (EB). El VIH, o virus del SIDA, se añadirá probablemente a la lista. Hace tiempo que se viene pensando que el uso de antígenos procedentes de estos virus podría movilizar el sistema inmunitario contra el cáncer, pero sólo muy recientemente se ha empezado a notificar resultados positivos al respecto.

Una joven firma británica de biotecnología, Cantab Pharmaceuticals, ha desarrollado una posible inmunoterapia contra el cáncer cervical basada en una proteína vírica. Y varias empresas han manifestado interés en comercializar una vacuna contra el virus EB, del que se cree que es la causa tanto del cáncer nasofaríngeo como del linfoma de Burkitt, tumor de los ganglios linfáticos habitual entre los niños en Africa. El ejemplo cundirá probablemente entre otras compañías.

Quizá sea el producto de Cantab el primero que se base en una demostración, mediante pruebas con animales, de que las proteínas víricas provocan una respuesta inmunitaria capaz de evitar tumores e inducir su regresión. La compañía, que concentra su esfuerzo en el desarrollo de terapias, fue creada en 1989 por Alan J. Munro, quien fuera jefe de inmunología de la Universidad de Cambridge, y Abingworth, un grupo de capital riesgo. Un acuerdo formal garantiza a Cantab la licencia exclusiva de la comercialización de la investigación inmunológica que la universidad lleve a cabo.

M. Saveria Campo y sus colaboradores, de la Universidad y el Instituto Beatson de Investigación del Cáncer de Glasgow, le abrieron el camino a este producto anticancerígeno. Los animales a los que se inyectó la proteína E7 del virus del papiloma bovino reforzaron su capacidad de lucha contra los tumores en la boca que la inoculación del virus propiamente dicho les producía. El tratamiento con E7 estimuló la respuesta inmunitaria celular, elemento esencial del sistema inmunitario, con mayor intensidad que el virus mismo. Si bien no se conoce aún qué papel desempeña, no es, seguramente, casual que la E7 interaccione con una importante proteína celular que regula el crecimiento.

Los resultados de Campo, que aparecerán dentro de poco en el *Journal of General Virology*, han dado el espaldarazo a que se investigue si se produce un efecto similar en los seres humanos. El virus del papiloma bovino es genéticamente muy similar al del papiloma humano tipo 16, causante de lesiones del cérvix que pueden devenir malignas. Se calcula que este tipo de cáncer mata anual-



Cornelia S. McLean (de los laboratorios Cantab) ha desarrollado una inmunoterapia contra el cáncer cervical que se basa en proteínas víricas. Pronto se iniciarán las pruebas clínicas con seres humanos.

mente a más de 300.000 mujeres en todo el mundo, casi tantas como el cáncer de mama.

Cornelia S. McLean demostró que las proteínas del virus del papiloma humano pueden también inducir una intensa respuesta inmunitaria. Para ello, McLean (por entonces en el departamento de inmunología de Cambridge y actualmente en Cantab) tomó como vector el virus de la vacuna, tan empleado en la vacunación contra la viruela. Inyectó a ratones ese virus, modificado de manera que produjese la proteína E7 del virus del papiloma humano tipo 16, y después observó la reacción que tenía lugar cuando se injertaban células productoras de E7 en la piel de los ratones. El pretratamiento con el virus de la vacuna modificado hizo que los ratones rechazaran los injertos con más rapidez de lo normal; esto indicaba que los animales se habían vuelto sensibles a la proteína (los resultados de McLean se han publicado en el número de febrero del *Journal of General Virology*).

Cantab colabora con Leszek K. Borysiewicz, de la facultad de medicina de la Universidad de Gales en Cardiff, para determinar si el virus de la vacuna productor de E7 genera respuestas inmunitarias en los seres humanos. Inicialmente, se inyectará el virus modificado (que también produce otra proteína vírica, la E6) a unas 10 pacientes con cáncer cervical avanzado. Aunque, según Munro, el uso de virus de la vacuna vivo comporte cierto riesgo, los experimentos sugieren que un virus activo da lugar a una respuesta mucho más intensa que una proteína purificada, no reconocida de igual manera por el sistema inmunitaria. "Aprovechamos las sutilezas del sistema inmunitario", afirma.

El trabajo de Campo sobre el virus del papiloma bovino fue financiado por la Campaña de Investigación del Cáncer, cuya sede se encuentra en Londres, organización que espera también conseguir una vacuna contra la infección por virus de papiloma; en enero saltó su nombre a los titulares de los periódicos a causa de su anuncio de otra vacuna preventiva, la vacuna contra el virus EB (de Epstein-Barr).

Se cree que el virus EB origina distintos tipos de cánceres, combinado, probablemente, con otros factores. Alrededor del 90 % de la población mundial está infectada por este virus, pero en los países desarrollados no suele causar enfermedad alguna; como mucho, fiebre glandular, una indisposición transitoria. No obstante, se encuentra el virus en células malignas de quienes padecen la enfermedad de Hodgkin. En Africa, aparece en las células del linfoma de Burkitt, y se le imputan unos 50.000 fallecimientos al año por cáncer nasofaríngeo en China.

La nueva vacuna contra el EB, a diferencia de la terapia anticancerosa de Cantab, es una versión sintética de una proteína que solemos hallar en el virus. El producto, culminación de más de veinte años de trabajo, se basa en las investigaciones de Andrew Morgan, de la Universidad de Bristol, y John R. Arrand y Michael Mackett, de la Universidad de Manchester, junto con otros colaboradores de la Universidad de Birmingham. Se obtiene a partir de células de ratón. Se ha demostrado que previene un linfoma en cierto tipo de mono. Si diera buen resultado en los seres humanos, podría convertirse en la primera vacuna concebida especialmente para prevenir el cáncer, si bien las vacunas contra la hepatitis B, utilizadas desde hace más de 10 años, impiden casi con seguridad el cáncer de hígado.

John Green, del Programa para el Desarrollo de Tecnologías Adecuadas para la Salud, de Seattle, institución que colabora con el proyecto internacional contra el virus EB, señala que varias empresas han expresado su interés en perfeccionar la vacuna. Para ello, no obstante, hay que afrontar muchas dificultades; ninguna mayor, quizá, que la pobreza de los países que más la necesitan, países que tienen, además, otras prioridades sanitarias. El uso de la vacuna contra la hepatitis B, por ejemplo, no se ha generalizado en el Tercer Mundo.

Morgan, de la Universidad de Bristol, cree que el trabajo sobre el virus EB conducirá finalmente, además de a una vacuna preventiva, a una vacuna terapéutica contra el cáncer o linfoma nasofaríngeo. Pudiera ocurrir, sin embargo, que estuviese basada en una proteína diferente de la que constituye el fundamento del producto profiláctico. En las personas infectadas por el virus EB, el sistema inmunitario muestra un aumento de actividad poco antes de manifestarse clínicamente el cáncer nasofaríngeo. Una vacuna que estimulase esa misma actividad podría, en su opinión, conseguir efectos terapéuticos.

Hasta hace poco, dice Morgan, "la gente que trabaja en el campo de las vacunas no era consciente de la complejidad de la respuesta inmunitaria, ni de que es posible alterarla selectivamente". Ahora parece que los virus han ofrecido a los de la Cantab, entre otros, un buen puñado de estrategias prometedoras.

La óptica da en el blanco

Ordenador óptico con memoria espaciotemporal

El cálculo digital dio un paso de gigante cuando se terminó, en la Universidad de Manchester, allá por 1948, el Mark I, primer computador enteramente electrónico capaz de almacenar en memoria su propio programa. No menos audaz —y vacilante— ha sido el avance operado en computación óptica, tan en su infancia aún, a principios de este año cuando Harry F. Jordan y Vincent P. Heuring, de la Universidad de Colorado, presentaron un ordenador (casi) óptico que almacena y maneja sus instrucciones y datos en forma de impulsos luminosos.

Como el Mark I, el ordenador óptico de bits seriados (OOBS) es grande y obtuso, y se ha construido sólo para probar un principio de la arquitectura de ordenadores. Apenas hace otra cosa que conmutaciones, recuentos y operaciones de aritmética de carácter básico, y sólo tiene 128 bytes de memoria. Ahora bien, todo eso lo hace de un modo radicalmente distinto de cualquier ordenador que jamás se haya construido.

La digital y electrónica prole del Mark I ha venido almacenando sus datos en los biestables o basculadores ("flip-flops"), dispositivos que toman y retienen cargas por medio de relés, tubos de vacío o circuitos de semiconductores. En ellos, la información queda confinada físicamente. Sin embargo, los equivalentes ópticos del biestable electrónico todavía operan muy lentamente, y por eso el OOBS utiliza en su lugar una memoria dinámica: los impulsos de radiación infrarroja que constituyen sus bits se mueven incesantemente por un circuito de fibras ópticas a la velocidad de la luz. "La información está siempre en movimiento; en cierto sentido, se almacena dondequiera que se encuentre, tanto en el espacio como en el tiempo", explica Heuring. "El quid está en disponer las cosas de tal modo que la información interaccione en el mismo lugar del espacio al mismo tiempo."

El OOBS logra esta proeza de sincronización valiéndose de un reloj que funciona a 50 megahertzs y conduciendo la luz por un trayecto que cubre distancias entre conmutadores cuidadosamente medidas. Antes de cada tic del reloj, los impulsos de control accionan conmutadores que dirigen de un trayecto a otro los bits que llegan, haciéndolos entrar y salir de líneas de retardo formadas por bobinas de fibra óptica con metros de longitud. Al contrario que el procesador electrónico, que recoge la información que necesita de una dirección de su memoria, el procesador óptico del OOBS espera que le lleguen los datos. Los contadores guardan registro de qué hay y dónde.

Los conmutadores son la única parte no enteramente óptica del sistema. AT&T, suministrador del grupo de Colorado, los construye difundiendo titanio por una superfice de niobato de litio, que es un sólido transparente, a fin de formar dos canales para la luz. Cuando se aplica una tensión eléctrica, los canales se hacen paralelos, y cuando cesa, se cruzan. Para accionar el conmutador, debe transformarse el impulso de control luminoso en un impulso eléctrico, y amplificarlo después. Jordan utiliza un ordenador corriente de sobremesa conectado a los amplificadores de conmutación para programar el OOBS y representar sus resultados, aunque en teoría un interfaz de fibra óptica funcionaría con pareja perfección.

El OOBS necesita, pues, electricidad para operar. Pero al relegar los electrones a un papel menor y prescindir por completo del almacenamiento estático, la estructura del ordenador se simplifica bastante. "Tal vez sea ésta la primera vez que puede representarse un ordenador completo en una sola transparencia de retroproyector", se ufana Heuring. "Normalmente, eso es imposible; hay tantos biestables, puertas y buses, y tantas otras cosas..."

La memoria dinámica ofrece otras ventajas: una de ellas es la velocidad ajustable de la máquina. Dado que el diseño se basa en el tiempo que tardan los impulsos de luz en pasar de un procesador al siguiente, un diseño funcionará igual a mitad de tamaño y doble velocidad de reloj; afortunadamente, ya que en su versión actual el OOBS ocupa una mesa entera. Jordan y Heuring lo están ahora integrando en un cilindro de niobato de litio, adherido a un disco de silicio o arseniuro de galio que contendría la electrónica de conmutación. El ordenador, que cabrá en la palma de la mano, se habrá achicado unas 400 veces y trabajará 400 veces más deprisa, a 20 gigahertzs.

El simple aumento de velocidad sin cambio de tamaño produce también resultados interesantes, como ha descubierto Jordan. "Si se cuenta con conmutadores rápidos, se puede duplicar la velocidad de reloj y acabar teniendo dos máquinas con un solo soporte físico, actuando aparentemente en paralelo, pero en realidad intercaladas en el tiempo." A 100 megahertzs, en otras palabras, el OOBS desarrolla una doble personalidad.

Las ventajas de la memoria dinámica han de pagarse, no obstante, en capacidad y en rendimiento, pues el almacenamiento espaciotemporal de información requiere gran cantidad de la una o la otra. Y cuanto más largo sea el circuito, más tiempo tendrá que esperar un procesador a que le lleguen nuevos datos. Heuring admite que esto limita la complejidad de las posibles aplicaciones. "Un OOBS sería ideal para una red de conmutación telefónica o de televisión por cable que encauzara y redistribuyera información secuencial procedente de cinco ciudades con destino a otras cinco, pero no valdría para el procesamiento de textos."

Es casi seguro que las primeras máquinas ópticas que se realicen tendrán un carácter híbrido, con conmutadores optoelectrónicos y algún tipo de almacenamiento estático. Conscientes de ello, Jordan y Heuring trabajan ya en un proyecto de procesador en paralelo en el que las bobinas de fibras se sustituyen por espacios vacíos y los conmutadores en serie por circuitos integrados optoelectrónicos (CIOE), unas formaciones cuadradas que por una cara tienen fotodetectores en miniatura y por la otra microláseres. Descansarán sobre sus bordes, a modo de fichas de dominó; tomarán la alimentación eléctrica por la base y recibirán los impulsos de control por arriba. En este nuevo diseño de Heuring, se utilizan hologramas generados por ordenador para redistribuir los bits desde un CIOE al siguiente.

Los investigadores de Colorado creen que el poder construir un ordenador con pastillas CIOE que contuviesen al menos un millón de conmutadores sería ya todo un logro. "El vídeo se ha de leer serialmente, y ése es el verdadero cuello de botella de la realidad virtual y de tantos y tantos gráficos y animaciones por ordenador", observa Heuring. "Con los CIOE, podríamos en principio trabajar, de una sola vez, sobre una trama de vídeo entera, o sobre un polígono completo generado por ordenador." Ninguno de los dos espera obtener un producto acabado antes de cinco a siete años, aun suponiendo que encuentren financiación. Pero un año de trabajo debería ser, en su opinión, suficiente para demostrar la validez de los principios en que se basan, y en tres años, vaticina Heuring, podrían conseguirse resultados preliminares.

Janet M. Strong-Gunderson

Pruebas en vuelo con moscas de la fruta

Ciertos estudios han mostrado que hay especies de insectos capaces de aprender por asociación. Esta habilidad es crucial para su supervivencia en ambientes donde se mezclan emanaciones químicas y señales ópticas. Usted mismo puede comprobar cómo aprenden los insectos a reaccionar ante un olor.

Introduzca una pieza de fruta en el fondo de un tarro transparente. Yo lo hice con plátanos pelados, pero los melocotones, las manzanas y las naranjas también sirven (utilice sólo un tipo de fruta). No conviene que el tarro sea demasiado pequeño; si lo es, las drosófilas no se desarrollarán plenamente y no volarán bien.

Ponga el tarro al aire libre, y observe cómo acuden a él insectos adultos. De muchas especies serán los visitantes, pero ello no afectará al proyecto. Pasados dos o tres días, lleve el tarro al interior de nuevo. Cierre su boca con una capa doble de estopilla; sujétela con una goma. Para que en su interior el ambiente se mantenga húmedo, puede que sea necesario colocar una toalla de papel humedecida sobre la estopilla. No permita en ningún momento que dentro del tarro se remanse agua.

Dependiendo de cuál sea la temperatura ambiente, los huevos estarán incubados en unas 21 horas, pero las larvas no se dejarán ver hasta pasados tres o cuatro días al menos. Hacia el quinto día saldrán de la fruta y subirán por las paredes, donde se convertirán en pupas. Los adultos aparecerán en unos cinco días; se aparearán, y pondrán huevos en la fruta. En mis experimentos conseguí los mejores resultados con moscas adultas de más de cuatro o cinco días de edad.

JANET M. STRONG-GUNDERSON trabaja en la división de ciencias del medio ambiente del Laboratorio Nacional de Oak Ridge. Investiga los procesos de destrucción por los microorganismos de los contaminantes químicos nocivos en la tierra y el agua. Se doctoró en zoología por la Universidad de Miami en Oxford (Ohio).

Para sacar los insectos del tarro habrá de construir un aspirador, pues las drosófilas son demasiado pequeñas y frágiles para cogerlas sin más. Necesitará dos conductos de cobre, de unos 4 cm de largo y un diámetro del orden de 0,6 cm, y un tubo de plástico flexible que mida de 75 a 100 cm; un tubo de tygon podría valer. Los conductos deben ajustar bien en el tubo, por lo que acaso deberá pasar algunos minutos en la tienda tanteando las medidas. Hágase con un bote de película fotográfica de 35 mm hecho de plástico transparente, o algo parecido.

Practique dos orificios en la tapa del bote, e introduzca un conducto de cobre en cada uno. Rellene uno de los conductos con un poco de algodón, pero sin que quede demasiado apretado. Corte en dos mitades el tubo de tygon, y fije cada mitad en un conducto. Coloque de nuevo en su sitio la tapa del bote. Para comprobar que no hay fugas, llévese a la boca el tubo unido al conducto taponado con algodón, y cierre con el dedo el extremo del otro. Cuando succione, deberá sentir un vacío. Si no es así, es que se ha dejado una fuga. Asegúrese de que la tapa ajuste bien y de que no entre aire por el perímetro de contacto entre el cobre y el tubo. Las fugas pueden taponarse con arcilla de modelar.

El aspirador ya estará entonces en condiciones de extraer las moscas del tarro. Para ello, meta el tubo sin algodón en el tarro de las moscas, y aspire por el otro. Las moscas irán a parar al bote de películas. El tapón de algodón impedirá que suban hasta su boca. Si el aspirador no funciona bien, compruebe que el algodón no está demasiado prieto, o si hay fugas. Quizá tenga que acortar el tubo o ajustar el diámetro. No es probable que la solución sea aspirar más fuerte.

Para mis ensayos con las moscas, construí un túnel de viento de 125 cm de largo, 60 cm de alto y 75 cm de ancho. Estas dimensiones se deben a que empleé un material ya cortado que recibe el nombre de *melamina*; es un tipo de conglomerado de madera que se utiliza mucho para construir estantes. Se vende en color blanco, con lo cual los insectos se ven mejor; tiene, además, una superficie lisa y pulida que aminora la turbulencia del aire.

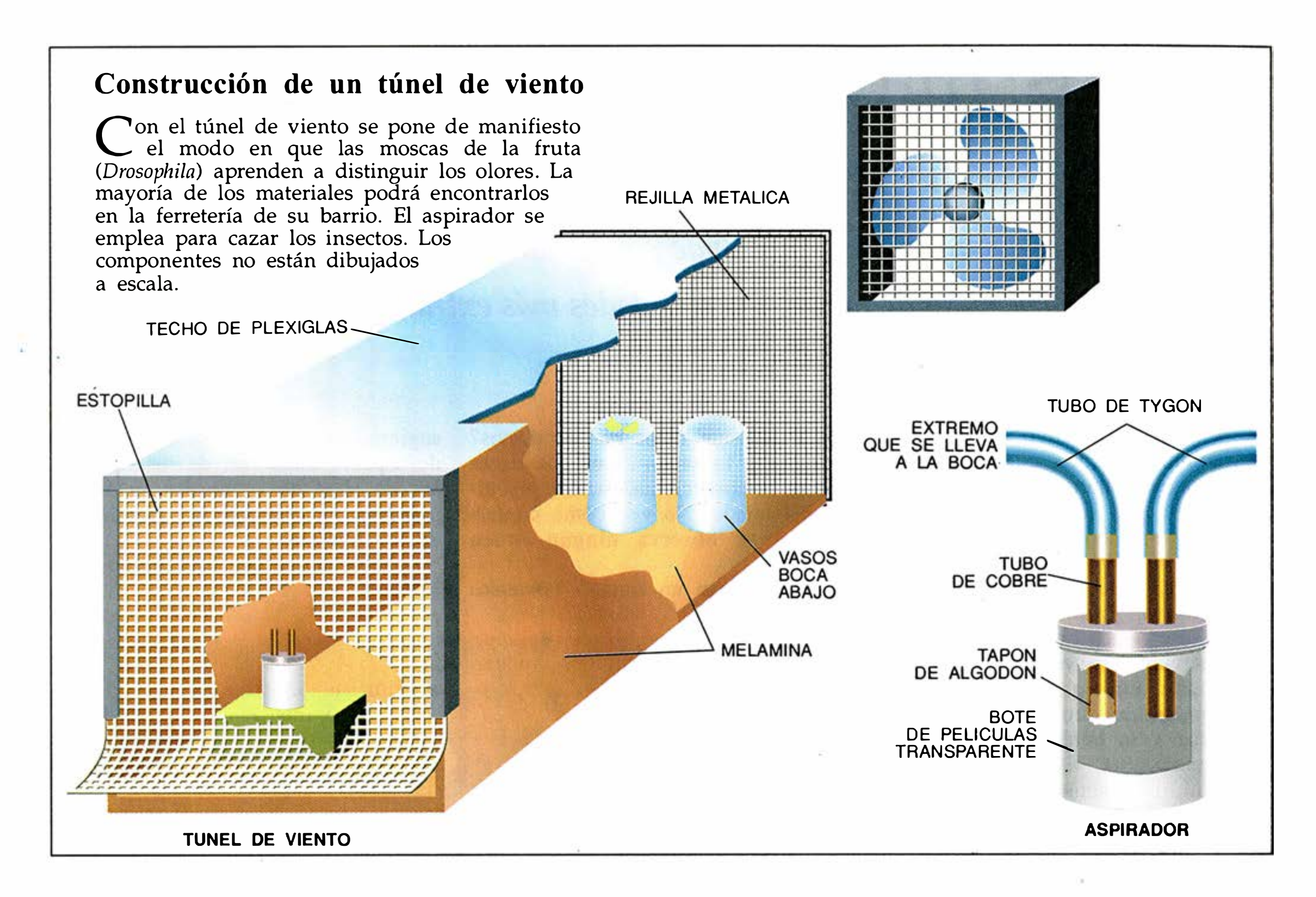
Formé el fondo y los lados con tres piezas de melamina. Para soportes de las caras usé dos trozos de madera de 2,5 × 5 cm. Para tapa superior compré una lámina de plexiglás, aproximadamente de las mismas medidas. En un extremo instalé, bien tensas sobre el marco, dos capas de rejilla metálica, que sirven para uniformizar la corriente de aire y reducir su velocidad. En la otra cara sujeté la estopilla por arriba, dejando suelto su borde inferior de manera que se pudiera meter la mano en el túnel al introducir los insectos. (Asegúrese de que la estopilla tiene la longitud precisa para que se pueda introducir su parte inferior por debajo del fondo.)

Generé el viento con un ventilador grande, del tipo normal de jaula. Les sugiero que lo ajusten a la velocidad mínima y lo sitúen a algo más de un metro de la rejilla. Dentro del túnel debe haber apenas una leve brisa.

Los resultados le satisfarán si la iluminación a lo largo de todo el túnel es uniforme e intensa. Lo mismo sirve un tubo fluorescente largo que dos lámparas de pie grandes y potentes colocadas en ambos extremos y en paredes opuestas. Los olores de fondo pueden causar dificultades.

La fruta debe encontrarse sobre algo que haga las veces de plataforma a unos 25 cm por encima del suelo del túnel, separada de la rejilla entre siete y quince centímetros. Descubrí que para esto van muy bien los vasos de beber, estrechos y colocados boca abajo. Coloque usted dos de ellos en el túnel, cada uno a unos cinco centímetros de los lados.

Para comprobar que el túnel funciona correctamente, tendrá que "hacer pruebas en vuelo" con alguno de sus insectos. Una vez haya meti-



Construcción de un túnel de viento

Con el túnel de viento se pone de manifiesto el modo en que las moscas de la fruta (*Drosophila*) aprenden a distinguir los olores. La mayoría de los materiales podrá encontrarlos en la ferretería de su barrio. El aspirador se emplea para cazar los insectos. Los componentes no están dibujados a escala.

do las moscas en el bote de películas, concédales unos minutos para que se calmen. Luego, desprenda los tubos de los conductos de cobre, y ponga el bote en posición vertical dentro del túnel sobre una plataforma que se alce a nueve o diez centímetros por encima del suelo. Pase un dedo por la fruta y con ese dedo toque levemente el conducto sin algodón; verá que por éste trepan las moscas. El proceso las ayuda a orientarse hacia los olores. Observe a continuación que los insectos "catan" la sustancia con que ha impregnado usted el cobre. Si los insectos no pudieran subir por el conducto, probablemente es que se adentra demasiado en el bote. Tire entonces del conducto hacia afuera, hasta que su extremo inferior esté casi enrasado con la tapa.

Cuando los insectos hayan salido del recipiente, se pondrán a pasear alrededor del extremo superior del conducto, y quizá desciendan por los costados. Cuando uno de los individuos "se lance" a volar en pos del olor a fruta, observará usted que al principio lo hará de lado en lado. Luego, conforme se vaya acercando a la fuente del olor, su vuelo cada vez se ciñe más a la fruta. Acabará posándose en ella. Puede que le cueste hacerlo por culpa de turbulencias en el lado de la fruta no expuesto al viento; vuelva a probar con un vaso menos ancho.

Una vez esté convencido de que sus moscas pueden actuar adecuadamente en el túnel, podrá empezar los experimentos. Sobre uno de los vasos coloque un trozo de la fruta en la que se criaron (plátano, en mi caso), y sobre el otro vaso, un trozo de gomaespuma u otro material inerte. La gomaespuma ha de tener más o menos el mismo tamaño y color que la fruta. ¿Hacia qué vaso se dirigen las moscas? Intercambie entonces las posiciones de la gomaespuma y la fruta. ¿Hay diferencia? Las moscas podrían preferir un lado del túnel y no el otro, condicionadas por la iluminación, la velocidad del viento o la turbulencia; quizá sea preciso ajustar las luces, la posición del ventilador o el tamaño de la plataforma de la fruta.

Seguidamente repita el experimento, pero sustituyendo la gomaespuma por otra fruta, melocotón por ejemplo. A veces pude observar que si un insecto criado en plátano comenzaba a volar siguiendo el rastro de olor de esa fruta y por alguna razón lo "perdía" y caía en el del melocotón, no se posaba enseguida en éste, sino que proseguía su búsqueda, vagando en vaivén y trazando arcos cada vez más amplios; muchas veces era capaz de reencontrar el olor a plátano, y entonces aterrizaba en él. Observé también que, cuando una mosca criada en plátano aterrizaba "por casualidad" en el melocotón, no solía quedarse mucho tiempo; empezaba a buscar otra vez.

En una tercera versión del experimento, ofrecí melocotón y manzana a moscas criadas en plátano: el número de moscas que se posaban en cada fruta era aproximadamente el mismo. El proceso de búsqueda parecía durar más que cuando una de las alternativas les resultaba familiar. Compruebe usted cómo reaccionan a olores "neutros" (de vainilla y almendras).

Los buenos resultados dependen del esmero con que se haya construido el túnel de viento, las condiciones en que se opera, como la velocidad del viento y la iluminación, y también la salud de los insectos. Acaso el chasco mayor que nos podamos llevar sea que los insectos no vuelen en absoluto. Ello puede deberse a varias cosas. El tamaño del túnel tiene su importancia; yo probé con dimensiones mayores y menores, y ni unas ni otras dieron resultado. Quizá los insectos sean demasiado jóvenes; pruebe a esperar dos o tres días.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

El arte de Anatolii Fomenko: Viaje por los entresijos de la mente de un matemático, donde moran las realidades más extrañas de su ciencia

Oliverio nos llevó precipitadamente a una callejuela; no parecía pesarle su enorme barriga, y apenas si pudimos seguirle; conmigo iba Leonor. Una vez allí, entramos en "El choque de los símbolos", una galería de arte.

–"Oliverio, ¿qué es todo esto...?

–Un arte —nos explicó— que dice ser matemático y verdaderamente lo es, un arte que, en mi opinión, ilustra la naturaleza profunda de las matemáticas y la auténtica matemática de la naturaleza. Es una exposición de Anatolii Fomenko.

–Un matemático —añadí yo— de la Universidad de Moscú, que se ocupa, sobre todo, de geometría y topología.

–Exactamente —dijo Oliverio—. Nació en Ucrania, en la ciudad de Donetsk, en 1945. Comenzó a pintar y a esculpir a eso de los 13 años; entre 1960 y 1975 ha creado más de 300 cuadros y dibujos inspirados en temas matemáticos. Fíjate en éste, por ejemplo [*véase la figura 1*]. ¿Qué os parece que representa?

–Una especie de rascacielos con lunares —aventuré yo.

–Me encanta la forma que ha tenido de poner esa mujercita diminuta, en lo alto, a la izquierda —dijo Leonor—. Pero... ¿qué es esa extraña escultura que tiene enfrente, ésa que parece un Henry Moore?

–Ya he entendido el rascacielos —ufanóse Oliverio—. Fíjate, Ian, ve contando el número de puntos a partir de lo alto de la pared de la izquierda.

–Veamos... Tres, uno, cuatro, uno, cinco, nueve, dos, seis.

–A mí me parece una sucesión de números aleatorios —opinó Leonor.

–Sí... ¡No! ¡Ya sé qué me recuerda! ¡3, coma, 1415926...! ¡Es el número π!

–¡Eso es! ¿Y qué me dices ahora de la pared de la derecha?

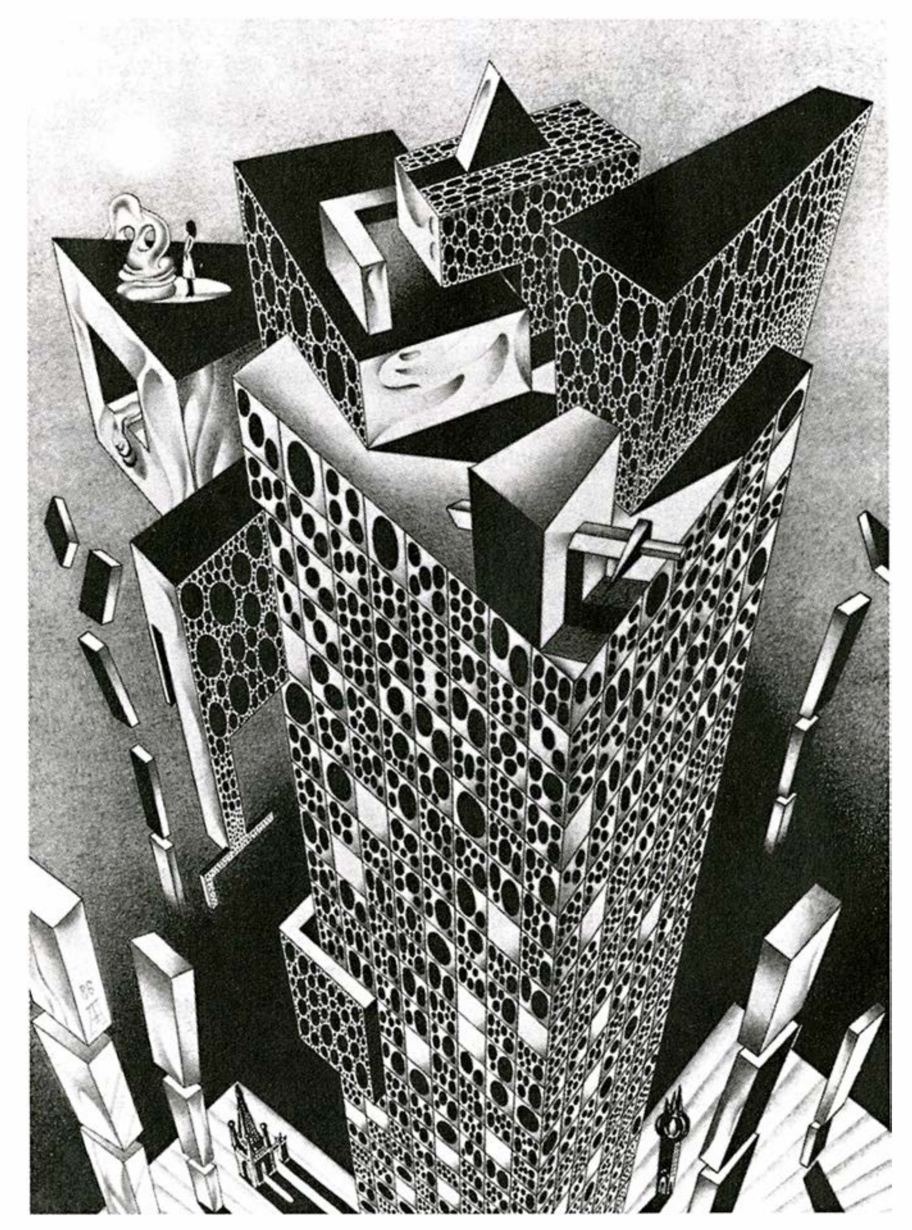
–Dos, siete, uno, ocho, dos, ocho: 2,71828, ¡el número *e*!

–En efecto. Este dibujo es la obra 242 de Fomenko, *Los notables números π y e, I*, de 1986.

–¿Y qué me dices de los discos? —preguntó Leonor—. Los que decoran las construcciones paralelepipédicas del tejado. No veo cómo contarlos; no se observa ningún orden particular.

–No. Forman un fractal. Fomenko sugiere que la estructura compleja, de aspecto aleatorio, de los decimales de π y de *e* plasma en forma numérica la complejidad geométrica de los fractales.

–¿Y la mujer que está frente a la estatua?



1. Los notables números π y e, I.

–Está observando una estructura topológica, una especie de neumático, o rosquilla, es decir, un *toro*, muy distorsionado.

–¡Ah! Veo ahí abajo otro de esos neumáticos retorcidos. En el n.º 11, el que se titula *Zoo topológico*, 1967 [*véase la figura 2*]. ¿De qué va ese dibujo?

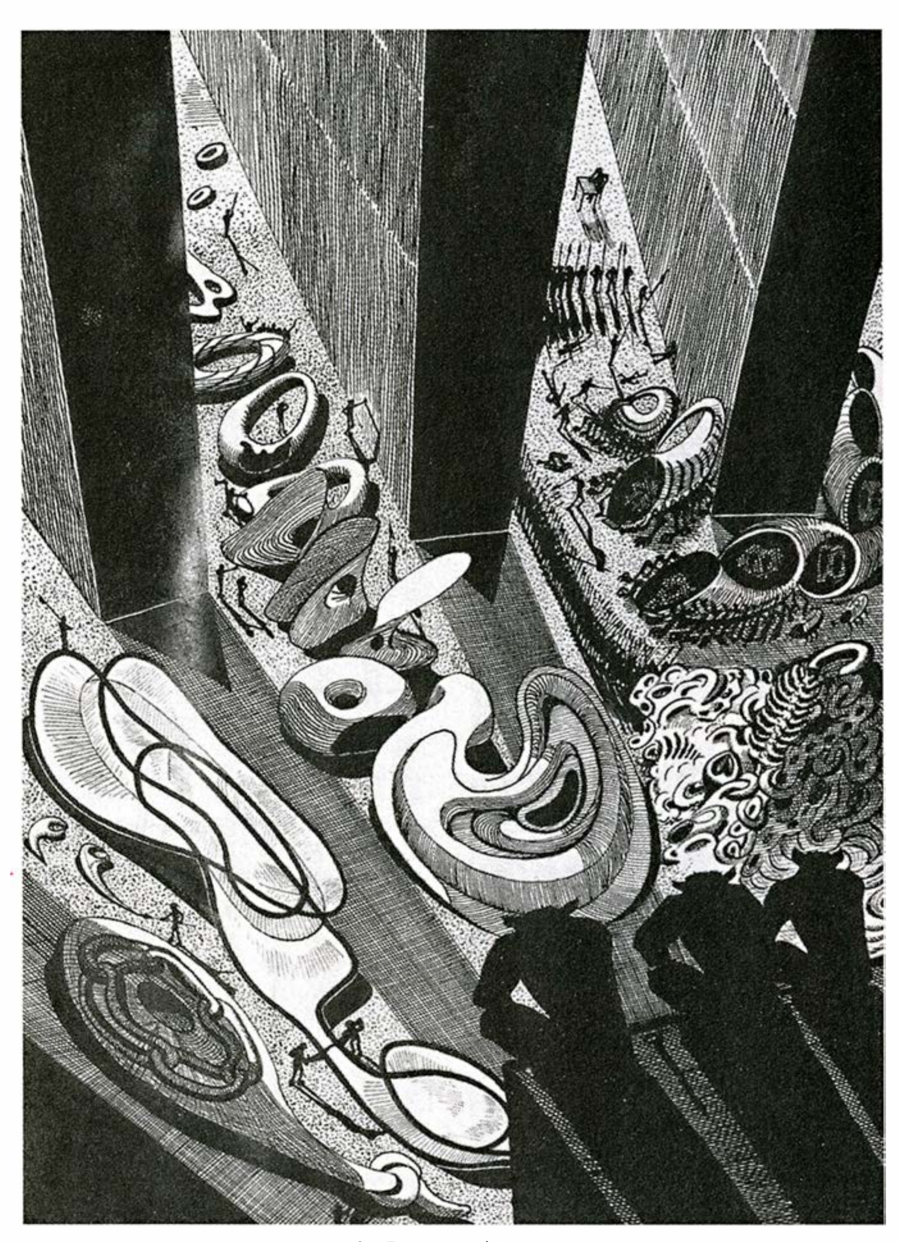
–De topología. La topología estudia las propiedades de las figuras que, cuando éstas son deformadas y modificadas como se quiera mientras no se las desgarre, permanecen. Es la matemática de la continuidad subyacente del universo.

–Si tú lo dices... ¿Y qué son esos tres bichos fantasmagóricos que parecen observar la escena?

–Son tres criaturas extrañas, aunque inteligentes, sentadas en alto dentro del gran salón de un castillo. Contemplan una procesión de formas topológicas. En primer plano, en el centro, un enorme toro está dándose a sí mismo la vuelta como a un calcetín; por así decirlo, se autorregurgita. Podemos hacer lo mismo con una cámara de neumático. Recortemos en ella un agujerito y vayamos empujando la pared del neumático a su través. ¿Qué te parece que resultará al final?

–Un embrollo horrible, me parece —dijo Oliverio.

–Pues no, se obtiene otro toro. Pero en lugar de tener un tubo de poco diámetro con un gran hueco en el centro se forma un "neumático dual", con un tubo de mucho diámetro y un pequeño orificio central. Fijaos ahora en la parte baja, cerca del ángulo inferior izquierdo; allí, a la sombra de un pilar, está la pieza llamada *el collar de Antoine*, obra del geómetra ciego del mismo nombre. Tomemos un toro que contenga una cadena de toros concatenados, pero de suerte que cada eslabón de la cadena conste a su vez de una cadena menor, y así sucesiva e indefinidamente. El objeto límite formado por esta infinitud de cadenas encajadas unas en otras constituye un ejemplo de conjunto totalmente desconectado (no-conexo, dicen los matemáticos), es decir, que no contiene ninguna parte mayor que un punto que sea "de una pieza"; sin embargo, cada punto se encuentra inextricablemente encadenado por una infinidad de bucles. (Un conjunto es conexo cuando todo par de puntos de él pueden comunicarse mediante un camino compuesto por puntos pertenecientes al conjunto.) Aunque la estructura se "descompone" en puntos separados, están tan apiñados unos contra otros que es imposible soltar los bucles.



2. Zoo topológico.

–¿Y qué es esa otra cosa que hay justo al lado? —preguntó Leonor.

–Es un bucle de alambre rígido sobre el cual está tendida una película jabonosa. Hacia 1850, el físico Joseph Plateau efectuó una serie de experimentos con pompas de jabón; observó que, al sumergir un bastidor de alambre rígido en agua jabonosa, la película de líquido adoptaba formas muy elegantes. Plateau se propuso hallar una teoría matemática que predijese qué forma adoptaría la película de jabón. La idea básica es que la superficie de la pompa ha de tener por frontera el bucle de alambre y poseer al mismo tiempo la menor superficie posible.

–¿Y eso por qué? —preguntó Oli.

–Porque la tensión superficial hace mínima la energía de la película, y tal energía es proporcional al área. Semejantes *superficies minimales* han sido muy estudiadas desde los tiempos de Plateau. Es un problema difícil. Por ejemplo, Plateau observó que al sumergir un tetraedro regular en la disolución jabonosa se obtienen seis triángulos que concurren en el centro del tetraedro. Fueron muchos quienes se esforzaron en demostrar que esta configuración hace mínima el área, pero hubo que esperar a 1976 para que dos matemáticos, Frederick Almgren y Jean Taylor, lo consiguieran.

–Plateau debió de poseer una notable intuición geométrica.

–En efecto. Y lo más curioso es que cuando estudió las películas de jabón estaba ciego. Había antes trabajado en óptica, y se quemó la vista observando el Sol.

–¡Ah! ¿Qué es esa especie de caracolas con patas que vemos arriba a la derecha?

–Son fragmentos de un espacio tal, que adquiere agujeros cada vez que se lo corte en dos. Lo que pasa es que Fomenko les ha puesto patas. Se trata de un contraejemplo utilizado en la teoría de espacios homológicamente conexos.

–Me parece que no me apetecería mucho oír hablar de ésos —murmuró Oli.

–Sabia conducta. Se va desmembrando lentamente en criaturas con colas de escorpión. El hombrecillo del escritorio, el que se muere de aburrimiento, es quizás un contable, que ha de registrar las piezas conforme van saliendo. Se cae de aburrimiento porque su monótona tarea no dará fin jamás: el número de caracolas es infinito.

–Si fuera un auténtico contable no se aburriría —dijo Oli—. Por el contrario, se felicitaría de tener un trabajo tan tedioso.

–Parece surrealista —dijo Eleonor.

–Porque las matemáticas son para ti surrealistas. El arte de Fomenko cala profundamente en la psiquis del matemático. Si pudieras penetrar en la mente de un matemático, te encontrarías cosas así.

–Desde luego, no me parece probable que pudieras hallar nada similar en la mente de un contable —opuso Oliverio, pérfidamente.

–Pues, Ian, no veo nada de matemático en la obra siguiente."

Estaba catalogada con el número 199, *Fantasía geométrica*, de 1968 [*figura 3*].



3. Fantasía geométrica.

–"Se trata de una evocación geométrica de la existencia de infinitos de tamaños diferentes —explicó Ian.

–Disculpa, ¿cómo has dicho?

–Me refiero a los números transfinitos, cuya teoría fue creando Georg Cantor a partir de 1874. Infinitos, infinitos mayores, y mayores aún, y así infinitamente...

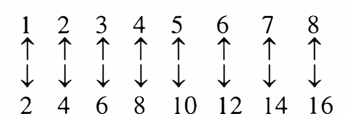
–Yo creía que infinito era lo más grande que se puede imaginar. No veo cómo establecer distintos grados de infinitud.

–Ello es perfectamente posible en la teoría cantoriana. Cantor estaba tratando de comprender los fundamentos del concepto de número. Supongamos que has puesto una mesa con muchos cubiertos. ¿Cómo podrías comprobar que hay igual número de cuchillos y de tenedores sin necesidad de contarlos?

–Bueno... ¡Ya! Asociándolos a pares. Si cada cuchillo se empareja con un tenedor, sin quedar ningún cuchillo ni tenedor suelto, habrá tantos de los unos como de los otros.

–Perfecto. Dos conjuntos finitos tienen el mismo número de elementos si es posible establecer entre ambos una correspondencia biunívoca. Cantor comprendió que se podría utilizar la misma idea con conjuntos infinitos, pues, aunque en tal caso no existe ningún número ordinario que exprese la multitud de sus elementos, todavía podemos decir que dos conjuntos infinitos tienen el mismo "número" de elementos si podemos emparejar biunívocamente los elementos de uno con los del otro, sin que sobre ni falte ninguno. Podremos a continuación inventar nuevos números que expresen la infinitud de dichos conjuntos. En la época de Cantor, a muchos matemáticos tal idea les resultó desconcertante, pero en nuestros días está perfectamente aceptada.

–Y es por cierto una brillante idea, aunque a veces parezca desembocar en situaciones paradójicas. Por ejemplo, hay tantos números enteros como números pares. Para verlo podemos asociarlos así



o sea, simbólicamente, $n \leftrightarrow 2n$. Este hecho era conocido ya por Galileo. Y desde luego, análogamente, hay tantos números enteros como enteros impares; simbólicamente, $n \leftrightarrow 2n - 1$. Podemos así escindir los enteros en dos subconjuntos,

cada uno con el mismo "número" de elementos que el conjunto total. Cantor inventó el símbolo $\aleph_0$, "aleph cero", para denotar este "número". $\aleph$ es la primera letra del alfabeto hebreo, y $\aleph_0$ el primero de los números transfinitos. La descomposición de los enteros en pares e impares prueba que $\aleph_0 = \aleph_0 + \aleph_0$. La aritmética de los números transfinitos es un poco rara, pero uno se habitúa.

–¿No será que $\aleph_0$ no es más un símbolo curioso pero equivalente a ∞? ¡Desde luego, dos veces infinito tiene que ser infinito, porque el infinito es la cosa más grande que existe!

–Pues no. Cantor contempló una sucesión creciente de "números transfinitos", o sea, una sucesión creciente de infinitos $\aleph_0 < \aleph_1 < \aleph_2 < \aleph_3$, y así indefinidamente. La colección de los números reales, o sea, los números con desarrollo decimal infinito, es mayor que la de los números enteros, en el sentido de que no se pueden emparejar biunívocamene unos y otros. Cantor esperaba que este nuevo transfinito fuese $\aleph_1$, el mínimo de los transfinitos mayores que $\aleph_0$, mas nunca consiguió demostrar que así fuese. El problema recibió el nombre de *Hipótesis del continuo*. En 1963, Paul Cohen demostró que la respuesta depende del sistema de axiomas lógicos que se utilice. Lo que Cantor sí consiguió demostrar es que la sucesión de transfinitos no tiene fin, que no existe un infinito mayor que todos los demás. Aunque tomásemos toda la sucesión $\aleph_0$, $\aleph_1$, $\aleph_2$,..., todavía podríamos encontrar uno mayor que todos estos, $\aleph_{\aleph_0}$. Y hay otro transfinito mayor que éste, y así indefinidamente. ¡Nunca dejan de hacerse más y más grandes!

Pues bien, esto es exactamente lo que ocurre en el cuadro. La procesión de encapuchados prosigue interminablemente hacia el horizonte, como los enteros 1, 2, 3, ... y llega allí, a esa especie de explosión de luz, representación de $\aleph_0$. Y allende el horizonte, más allá de $\aleph_0$, como los números reales, las montañas; y más allá de las montañas, las nubes de transfinitos que se alejan a las más remotas regiones, capa tras capa de oscuros nubarrones de tormenta que desdibujan el disco ardiente de un sol enigmático...

–Dejemos a los poetas el lenguaje florido, Ian. Es una imagen feliz, estoy de acuerdo. ¿Y de qué va este otro? Parece mucho más matemático."

Oliverio echó un vistazo a la leyenda: Número 233, 1985: *Una esfera bidimensional en un espacio tridimensional puede ser vuelta del revés* [*figura 4*]...

"Tienes razón, sí; es una descripción bastante directa de un proceso no poco sorprendente. En su tesis doctoral, que es de 1959, Stephen Smale demostró que se puede volver una esfera del revés. ¡Al principio, el director de su tesis no podía creerlo!

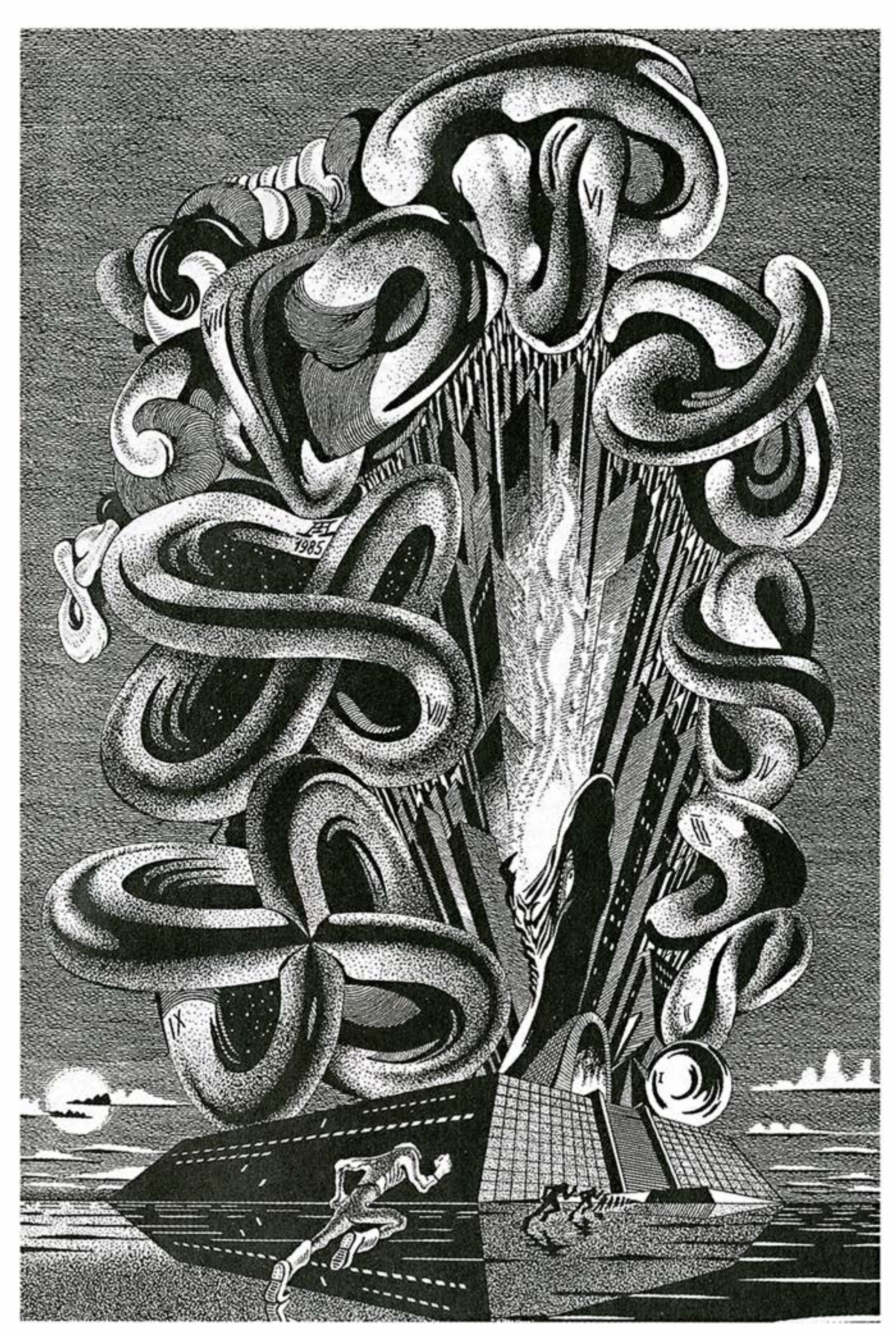
–¡No me sorprende, la verdad!

–Bueno, es que la esfera puede pasar a través de sí misma.

–Así es trampa.

–No tanta como piensas. Sigue siendo preciso mantener la superficie lisa, sin pliegues. No es tan fácil. A decir verdad, Smale no logró descubrir un procedimiento explícito para conseguirlo. Más tarde, Nicolaas Kuiper y Arnold Shapiro hallaron, cada uno por su cuenta, procedimientos para "extroverter" la esfera, como se dice en la jerga. Bernard Morin, quien, dicho sea de paso, también es ciego, mejoró el método de Shapiro, convirtiéndolo en el muy elegante que muestra la pintura de Fomenko.

El cuadro deja ver una esfera en la parte inferior derecha. Al movernos en sentido antihorario (los mate-



4. Una esfera bidimensional en un espacio tridimensional puede ser vuelta del revés.

máticos siempre van en sentido contrario al de las agujas del reloj, no sé por qué) podemos ver las sucesivas etapas de la deformación, hasta que abajo de nuevo, pero a la izquierda, vemos una superficie en cruz. En esa fase estamos justamente a medio camino. En el interior de la figura, unida a ella suavemente, sin roturas, tenemos una continuación suya, que también es una cruz de cuatro brazos, pero cuya pared ha sufrido tan gran contorsión que su exterior está formado a partir del revestimiento interior de la esfera. Las dos cruces, conjuntamente, forman una superficie denominada 'doble cubierta de la inmersión de un plano proyectivo'. Un plano proyectivo tiene en realidad sólo una cara. Le pasa lo mismo que a la botella de Klein.

–¿Qué es una botella de Klein? —preguntó Leonor.

–Es algo así como la inmersión de un plano proyectivo —dijo Oliverio, tan cazurro como siempre.

–¡Deja de fastidiar, Oli! La botella de Klein es una superficie famosa, que tiene una sola cara.

–¿Y una 'cubierta doble'?

–Es una copia de la superficie, que consta de dos hojas que se envuelven cada una a la otra. De esta forma, cuando las dos cruces pasan la una a través de la otra para intercambiarse los papeles, también se intercambian el exterior y el interior. Después podemos invertir toda la secuencia de transformaciones para recuperar otra vez la esfera. Sólo que ahora está vuelta del revés.

–Un truco muy astuto —dijo Oliverio—. El estadio intermedio, el plano proyectivo inmerso, se ha hecho tal lío acerca de qué lado es el interior y cuál es el exterior, que su interior y su exterior son intercambiables.

–Ni siquiera existen. Pero si existieran, tendrías toda la razón —comenté."

Avanzamos un poco más por la galería. "¡Mira, aquí hay uno interesante! —dije yo—. La topología no es mera matemática, pura y abstracta; también podemos servirnos de ella para comprender mejor el universo físico. Fijaos en este cuadro: n.º 252, 1972: *Movimiento de un cuerpo pesado y rígido en el espacio [figura 5]*. Los matemáticos clásicos, como Joseph-Louis Lagrange, tropezaron con enormes dificultades cuando quisieron resolver las ecuaciones del movimiento para un cuerpo rígido general. Sabían arreglárselas en el caso de que el cuerpo presentase ciertas peculiaridades; si era simétrico, por ejemplo. Pero el caso general les desconcertó. Merced a un análisis topológico de las consecuencias de estas ecuaciones, sabemos hoy el porqué de sus dificultades. El movimiento de un cuerpo rígido general puede ser caótico —determinístico, sí, pero tan intrincado que puede parecer aleatorio—; irá entonces dando tumbos erráticamente por todas partes. Hiperión, uno de los satélites de Saturno, es un ejemplo real. El tipo de soluciones a que aspiraba la matemática clásica —pulcras fórmulas que dieran la posición del objeto en un instante cualquiera— no funciona cuando hay caos. Fomenko plasma estas ideas creando una inmensa región cavernosa con estalactitas y cosas por estilo (que representa el espacio); formas dinámicas que emiten lenguas de fuego representan el movimiento. Atended a la banda lisa y azul por donde corre el objeto flamígero. La lisura y regularidad de la banda representan los movimientos sencillos y clásicos de un cuerpo rígido. Pero éste va dejando por los bordes una estela de formas mucho menos estructuradas, que sugieren la posibilidad del caos. No en el caso de este cuerpo particular, debería añadir, pues es simétrico, como sugieren el detalle fino, las crucecitas y demás pormenores. El propio co-



5. Movimiento de un cuerpo rígido y pesado en el espacio.

mentario de Fomenko así lo confirma."

Leonor se había adelantado; exploraba por su cuenta. "¡Esto es lo que yo llamo un título sucinto de verdad! —comentó—. Número 254, 1980: *Puntos singulares de campos vectoriales y capa límite de un flujo líquido en torno a un cuerpo rígido*." [*Figura 6*.]

–Sí, bueno... los títulos no lo son todo. Veréis, cuando un fluido corre sobre un objeto complejo, de superficie irregular, tiende a desgarrarse en formas tortuosas. Lo más interesante se produce en la "capa límite", donde el fluido entra por primera vez en contacto con el objeto. Perturbaciones diminutas en la capa límite pueden crear enormes remolinos en el flujo circundante. Así es como da comienzo la turbulencia. Los matemáticos modelizan el movimiento fluido mediante un "campo vectorial", que define en cada punto del espacio la dirección y magnitud de la velocidad del fluido; por su mediación se pueden determinar las líneas de flujo, que son las trayectorias descritas en su movimiento por las partículas del fluido. Los puntos singulares son lugares especiales del campo de vectores en los cuales la velocidad se anula; el líquido crea en ellos figuras interesantes: fuentes, sumideros, puntos de ensilladura. Podemos así remontar las complejas formas de un flujo fluido hasta las características, más simples, de su campo de velocidades, y ver que, aunque los fluidos se comportan de unas maneras increíblemente intrincadas, las leyes que bajo éstas se ocultan son en realidad muy sencillas.

–Parece un panal derretido —dijo Leonor, con aire reflexivo—. ¡Qué imaginación más curiosa! Me pregunto qué pudo inspirar a Fomenko figuras tan notables.

–Escucha —dijo Oliverio— lo que él mismo dice de su obra:

> Tengo la impresión de que las leyes generales de la naturaleza son tan poderosas que apenas se nos alcanza su fuerza. Y son ésas las leyes que rigen nuestro mundo. Las trayectorias de nuestras vidas, en cierto sentido nuestros movimientos, están determinados por ellas, y así es por mucho que haya estrechos cauces por los que nos movamos libremente.
>
> Somos, en cuanto individuos, tan minúsculos, que sólo podemos ver una pequeña parte de este mundo, que es mucho mayor que nosotros, hasta el extremo de que supera nuestra capacidad de comprensión. Sin embargo, gracias a las matemáticas podemos hacernos una cierta idea general de cómo es este mundo ante el que tan pequeños somos, aunque ciertamente no podamos entender todos sus detalles. Eso es sencillamente imposible.

–Vaya —dijo Leonor—. No son las imágenes surrealistas mis favoritas; sin embargo, percibo la profundidad de los conceptos que estos cuadros encierran. Te dicen: matemáticas y arte, y piensas enseguida que te van a obsequiar con trivialidades numéricas, con vagos y palabreros lugares comunes. Pero ¡las esferas vueltas del revés son otra cosa!



6. Puntos singulares de campos vectoriales y capa límite de un flujo líquido en torno a un cuerpo rígido.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MATHEMATICAL IMPRESSIONS. Anatolii Fomenko. American Mathematical Society, Providence, Rhode Island, 1990.

A TOPOLOGICAL PICTUREBOOK. George K. Francis. Springer-Verlang, Nueva York, 1987.

TURNING A SURFACE INSIDE OUT. Anthony Phillips. *Scientific American*, págs. 112-120, mayo de 1966.

MATHEMATICS AND THE IMAGINATION. Edward Kasner y James Newman, Bell, Londres, 1961

Libros

R. Farré, M. I. Vicente, A. I. Alcalde, J. de Lorenzo y L. Alonso

Radón

Enfoque pluridisciplinar

EL RADÓN Y SUS RIESGOS. León Garzón Ruipérez. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, 1992.

El gas radón es un elemento radiactivo natural cuya influencia en la dosis de radiación absorbida por la población tal vez no siempre se valora en su justa medida. *El radón y sus riesgos*, monografía de León Garzón a él dedicado, está escrita con un enfoque multidisciplinario que, al aportar puntos de vista distintos pero complementarios, puede ser útil al lector no especializado e interesado en temas como la física, la ingeniería, la arquitectura o la medicina.

En los primeros capítulos el autor expone los conceptos físicos fundamentales para comprender el origen del radón y sus propiedades físicas. La historia de la radiactividad y del radón se expone brevemente a través de la descripción de los experimentos más significativos llevados a cabo alrededor del inicio del presente siglo. A continuación se describe la estructura de la materia en sus sucesivos niveles (núcleo, átomo, molécula, substancia y cuerpo), prestándose especial atención al núcleo atómico, a su estabilidad, al fenómeno radiactivo y a su medida. Seguidamente, el autor se centra en las propiedades físicas del radón. Para ello se sitúa al radón y a sus antecedentes y descendientes en las distintas series radiactivas naturales. Se indica que los riesgos que el radón presenta para el hombre se ven potenciados por la gran movilidad que le confiere el hecho de ser un gas en estado natural. El autor explica que el radón originado por la descomposición radiactiva natural del ^{226}Ra en el seno de la corteza terrestre se desplaza a la superficie por emanación gaseosa o disuelto en las aguas subterraneas emergentes, y que ya en la atmósfera es distribuido por las corrientes de aire.

Una vez descritas las propiedades físicas del radón y los riesgos biológicos que su radiación ionizante asociada presenta para el hombre, se consideran los procesos que conducen a la presencia de radón en la superficie terrestre y, en especial, en el interior de los edificios. En primer lugar se describe el proceso de transporte de radón a través de la corteza terrestre mediante un modelo difusivo que permite cuantificar la concentración de radón en los estratos y se indican valores experimentales de la exhalación de radón. También se describen las variaciones de concentración de radón en los distintos niveles atmosféricos y su periodicidad diurna. Se indica que las corrientes de aire atmosférico desempeñan un papel importante en la diseminación de los núcleos descendientes del radón en forma de iones solvatados o en aerosoles que, por deposición sobre los vegetales comestibles, pueden ser una fuente de riesgo añadido para el hombre. Por otra parte, se plantea la presencia de radón en la hidrosfera y se muestran datos obtenidos en aguas fluviales, oceánicas y subterráneas.

Una vez examinada la presencia de radón en el medio natural donde se desarrolla la vida humana se analiza de forma especial la presencia de radón en las viviendas. Para ello se plantea un modelo de cavidad para determinar el índice de concentración de radón en estado estacionario en cavidades subterráneas sin ventilación. A continuación se analizan los parámetros que influyen en la concentración de radón en los edificios: la composición del terreno, la exhalación del suelo, la ventilación de aire, los materiales de construcción y las redes de distribución de gas y agua. Se muestran resultados de mediciones efectuadas en viviendas y se plantean posibles medidas para el control y la reducción de radón en los edificios.

Descritos los procesos conducentes a la presencia de radón en el medio vital humano y cuantificada su concentración, el autor introduce los conceptos fundamentales de la radiobiología. En primer lugar se definen las magnitudes de exposición a la radiación y de dosis absorbida. Para cuantificar los efectos que una determinada dosis puede producir en un medio biológico, se introducen los conceptos de eficacia biológica relativa de una radiación y de dosis equivalente. También se indica que cada tejido biológico presenta una diferente radiosensibilidad y que además, debido a la acción de mecanismos de reparación, los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes dependen tanto de la dosis total absorbida como de su distribución temporal. Para comprender los efectos de las radiaciones ionizantes en la materia viva se describen los distintos procesos físicos de ionización que tienen lugar (efectos fotoeléctrico, Compton y de creación de pares). Seguidamente se discuten los efectos moleculares de la radiación, tanto los directos (ionizaciones en moléculas de gran importancia biológica como ADN, proteínas, etc.) como los indirectos (como consecuencia de la radiolisis del agua). Para el estudio de los efectos somáticos y genéticos de la radiación ionizante, se introduce el concepto de proceso estocástico y no estocástico.

Después de la exposición de los conceptos básicos de la radiobiología, el autor se refiere ya específicamente al radón. Para ello, muestra valores típicos de las dosis de radiación absorbidas e indica que para el conjunto de la población el radón es responsable de aproximadamente la mitad de la dosis de radiación total absorbida. Se plantea que, para el estudio de los efectos cancerígenos, los modelos dosimétricos de la absorción del radón inhalado y de la deposición de sus descendientes en el sistema respiratorio son de gran interés. Finalmente, se muestran resultados de estudios epidemiológicos de dosis-respuesta en poblaciones que, como en el caso de los mineros de uranio, están sometidas a altas concentraciones de radón en la atmósfera.

Además de por la información contenida, *El radón y sus riesgos* presenta también un considerable atractivo desde el punto de vista docente. En efecto, su lectura puede ser de interés para estudiantes universitarios de diversas disciplinas, por cuanto es un ejemplo de cómo

las distintas ramas del saber pueden integrarse y aportar sus conocimientos y herramientas de análisis para el estudio de un tema de interés general. (R. F.)

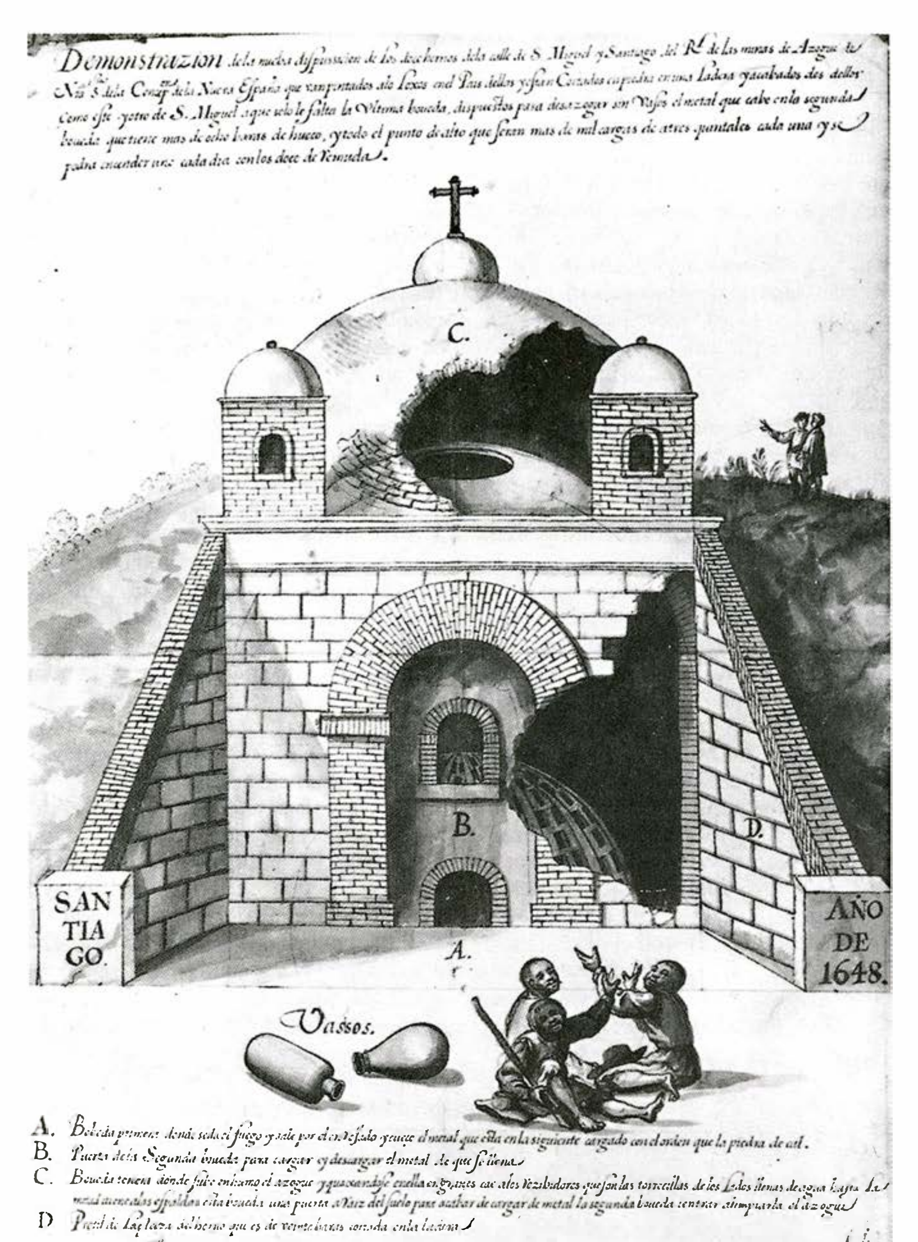
Técnica en Hispanoamérica

Otro legado de España

Del dios del fuego a la máquina de vapor. Introducción de la técnica en Hispanoamérica, por Nicolás García Tapia. Ambito. Instituto de Ingenieros Técnicos de España; Valladolid, 1992.

La influencia de la tecnología en el desarrollo del descubrimiento de América por los españoles es un hecho innegable, a pesar de que los historiadores se hayan preocupado mucho más por los aspectos religiosos, militares, sociales y económicos. Por ello, hemos de celebrar la publicación de este libro, que de forma amena y rigurosa estudia la introducción de la técnica en Hispanoamérica.

Nicolás García Tapia, ingeniero industrial y doctor en historia del arte, se ha destacado en sus numerosos trabajos por apoyar sus argumentos y exposiciones en una sólida base documental. *Técnica y poder en Castilla durante los siglos XVI y XVII, Arquitectura e ingeniería en el Renacimiento español* o *Patentes de invención españolas en el siglo de Oro* —por citar sólo algunos de sus últimos libros— son una muestra de su buen hacer y de su destacada contribución al conocimiento de la técnica española en su época particularmente brillante de nuestro pasado.



Horno para minas de mercurio

El título de libro *—Del dios del fuego a la máquina de vapor—* señala la intención del autor de remarcar el cambio de civilización que se introdujo en el Nuevo Mundo por el descubrimiento, pasando del fuego sagrado al nuevo dios de la revolución industrial: la máquina de vapor. Pero sin juzgar los hechos, sino dando datos para tratar de comprenderlos dentro de las circunstancias de la época en que tuvieron lugar. Hay que destacar que García Tapia adopta el punto de vista de los personajes protagonistas de los avances técnicos que va estudiando y recoge sus mismas palabras —a través de numerosos documentos, sacados de diferentes archivos españoles— situándose en su tiempo, siglos XVI y XVII principalmente, adentrándose en ocasiones hasta el siglo XIX. Ello le permite valorar adecuadamente acontecimientos pasados, que sin duda se desfiguran cuando se pretenden estudiar desde nuestra mentalidad y circunstancias. España, que fue "Indias de romanos", tal como afirma uno de los técnicos españoles, Jerónimo de Ayanz —a quien García Tapia dedica numerosas páginas por ser el inventor de la primera máquina de vapor en el inicio del siglo XVII— se convirtió en la época del descubrimiento de América en la Roma del Nuevo Mundo.

El autor subraya que la trascendencia del descubrimiento de América era un hecho reconocido en el siglo XVI: en un libro de 1580, Johannes Stradanus presenta un grabado celebrando, de manera simbólica, los nueve grandes descubrimientos e invenciones que habrían caracterizado el Renacimiento, y en primer lugar sitúa el descubrimiento de América. Pero tal empresa fue posible gracias al desarrollo que había alcanzado la técnica de Occidente, y en particular la española. Y naturalmente el nuevo continente tenía sus formas propias de tecnología.

El libro se centra principalmente en la técnica industrial: diferentes tipos de molinos, como los de pólvora, de papel o batanes; ingenios dedicados a la industria del tabaco, de la caña de azúcar y de otros cultivos industriales muy importantes en América; técnicas de la minería y máquinas utilizadas en la aireación y desagüe de las minas.

En cada uno de los capítulos Ni-

colás García Tapia describe las invenciones que se fueron introduciendo y demuestra que no es cierta la idea generalizada de que las patentes de invención americanas comenzaran en los Estados Unidos, pues cuando en la América inglesa se inició el sistema de patentes, éstas ya llevaban más de un siglo realizándose en Hispanoamérica, siguiendo el modelo de los llamados privilegios por invención españoles. Tomando las palabras del autor: "asombra conocer la cantidad de invenciones que se presentaron para patentar en América en el siglo XVI y más aún la calidad de algunas de ellas". Apoyando esta afirmación, en el último capítulo, dedicado a la América inventora, recoge la biografía de numerosos personajes que idearon nuevas técnicas, relacionadas con procesos industriales, aplicadas o proyectadas para los territorios de la América española y cuya labor ha sido prácticamente desconocida.

Por todo ello, este trabajo —presentado en un libro cuidadosamente editado, con numerosos grabados que ilustran un texto de amena lectura— es una importante contribución en el final de la conmemoración del V Centenario y abre un camino que amplía el conocimiento sobre Hispanoamérica, que deberá tener una continuación en la conmemoración del VI Centenario. (I. V. M.)

Fisiología animal

Receptores

THERMORRECEPTION AND TEMPERATURE REGULATION. Dirigido por J. Bligh y K. Voigt; Springer Verlag; Berlín, 1990.

Nos hallamos ante una investigación y revisión actual de la termorrecepción y de la regulación de la temperatura, a cargo de distintos especialistas que abordan todos los flancos de la cuestión. Los capítulos se suceden manteniendo una misma pauta sistemática: introducción, material y métodos, discusión, conclusiones y bibliografía.

Consta la obra de seis partes. Y arranca con el fenómeno de transducción de la temperatura en respuestas celulares, lo que obliga a cribar la noción de especificidad de los receptores y de las vías de sensibilidad, deteniéndose en la termo y mecanorrecepción. Establecidas las bases se estudian las diversas teorías y modelos de transducción de la temperatura, analizando la respuesta estática y dinámica, sobre todo de los receptores del frío, en distintas especies animales; se destaca también la importancia de otros receptores (mecano, electrorreceptores, etc.) en la modulación de los estímulos térmicos. Se detiene en la localización y función de los termorreceptores de la piel y grupos neuronales hipotalámicos relacionados con ellos; se ejemplifica la sensibilidad a la temperatura en elasmobranquios, y se describe la regulación a largo plazo de las neuronas hipotalámicas por neuropéptidos (bombesina, sustancia P).

Estudiados los receptores térmicos y sus mecanismos, hay que atender al procesamiento central de la información térmica, investigando en primer lugar la respuesta neural en sus distintos niveles (médula espinal, tálamo, núcleos centrales y corteza) a la sensación térmica. Tras la parada en la sinapsis, conviene proseguir con las proyecciones centrales de los termorreceptores y el procesamiento de la información térmica.

Llegamos así al tercer apartado, de sabor epistemológico, sobre la definición de la percepción y de la fisiología de los sentidos de acuerdo con las distintas teorías. Cerrado el cual, se ocupa el cuarto de las implicaciones funcionales. Así se desarrolla la interacción entre poblaciones de termosensores y procesos de retroalimentación en la homeotermia y homeostasia de los mamíferos. Se describe la relación entre la señal de temperatura de los termorreceptores de la piel y centrales, y la activación/desactivación del sistema termorregulador (metabolismo, etc.). No se olvida de otros aspectos, verbigracia, del control de la interacción entre los sistemas de retroalimentación autonómicos y la circulación y la respiración durante el temblor por termogénesis.

Al centrarse en la adaptación y la regulación de la temperatura, encontramos trabajos sobre los fenómenos adaptativos a corto y largo plazo, los modelos de adaptación al frío y el calor, la adaptación estacional de la producción termorreguladora y la termorrecepción y regulación de la temperatura en animales hibernadores. Por último, se aborda el proceso febril. Comienza por detallar la neurobiología de los pirógenos endógenos, su naturaleza y efectos y de las estructuras neuronales implicadas con dichos efectos; continúa con los sistemas peptidérgicos del área ventral septal y del sistema límbico en la termorregulación (antipiresis) y traza la filogenia de la fiebre.

En resumen, este estudio de la termorrecepción y la regulación de la temperatura constituye una puesta al día y una síntesis de ese dominio de la fisiología animal, completadas con índices y referencias bibliográficas exhaustivos. (A. I. A.)

Metodología

Filosofía de la matemática

THE SPACE OF MATHEMATICS. PHILOSOPHICAL, EPISTEMOLOGICAL AND HISTORICAL EXPLORATIONS. Dirigido por Javier Echeverría. Andoni Ibarra y Thomas Mormann. Walter de Gruyter; Berlín, 1992.

En septiembre de 1990, la Universidad del País Vasco organizó un symposium internacional sobre *Estructuras en Teorías matemáticas*. Las comunicaciones presentadas al mismo las editó dicho centro con ese título el mismo año. De las ponencias y conferencias impartidas se recogen veintitrés, en versión en algunos casos revisada, en el volumen del que aquí se da noticia.

Los editores distribuyen los veintitrés ensayos en cuatro apartados que titulan: Dimensiones estructurales, Dimensiones de aplicabilidad, Dimensiones históricas y Dimensiones globales de conocimiento. Una distribución que no impide, ciertamente, su solapamiento porque hay un tema común —la filosofía de la matemática— y un sentimiento común: el de que este tema ha cobrado un renovado interés que supera las viejas tradiciones globalizadoras y fundamentalistas pero que, por ello mismo, obliga a la búsqueda de nuevas líneas de discusión en un campo que muestra una complejidad absoluta.

Renovación en la filosofía de la matemática que se viene propugnando desde la década de los setenta, al menos, y que ha conducido a que las nuevas tentativas impregnen de elementos sociológicos, pragmáticos, históricos... al análisis conceptual.

Los editores, en un breve ensayo introductorio, señalan con nitidez algunos de los elementos de las "nuevas filosofías de la matemática" con la aparición de dos grandes líneas como sostendrá en su ensayo Grattan-Guines: una *filosofía de la matemática de los filósofos* —centrada en los tópicos de la lógica, teoría de conjuntos, aritmética elemental de números...— y una *filosofía de la matemática de los matemáticos*, que toma en cuenta la matemática real y

deja de problematizar cuestiones como "2 + 2 = 4" que son las líneas por las que discurren los filósofos.

Ciertamente esas dos líneas de trabajo han surgido desde que los matemáticos han vuelto a plantearse la problemática de su hacer, una problemática que habían abandonado desde los años treinta. Vuelta que ha significado un giro en cuanto al papel que se asignaba y se asigna al elemento filosófico: el de considerar que la filosofía fuera la clave para alcanzar un fundamento definitivo del hacer matemático. El papel de la filosofía, de la filosofía de la matemática, ya no es el de proporcionar dicho fundamento ni solucionar la problemática respecto al estatuto ontológico de los objetos matemáticos, sino realizar un análisis crítico de un hacer, de una praxis existente: el hacer matemático. Con ello, y en el fondo, la filosofía vuelve a uno de sus papeles originarios.

Sin embargo, este desgajamiento condiciona algunos enfoques y, así, parece predominar en casi todos los autores de los ensayos aquí reunidos un cierto naturalismo que se arropa con expresiones y leyendas que se acogen al semiexperimentalismo o semiempirismo. La matemática como hacer cuasi-empírico es una tesis sostenida por Tymozcko en línea pretendidamente lakatosiana y que, en este volumen, muestra su máximo representante en Echeverría, quien se apoya en la historia del teorema del número primo para avalar esta tesis. Tesis que encuentra un casi único oponente en el ensayo de Niiniluoto, que realiza la crítica de estas posiciones desde la ontología del tercer mundo popperiano.

Curiosamente, es enfoque, el naturalista, que mantiene la problemática surgida desde el formalismo respecto al milagro de la efectividad de la matemática para las ciencias empíricas. Problemática superada, incluso inexistente, desde otras posiciones. Las relaciones matemática y ciencias empíricas cobran, en este volumen, inusitado relieve: relaciones de semejanza, analogías, reduccionismos... constituyen el tema no sólo de los cinco ensayos que se agrupan bajo el apartado "dimensiones de aplicabilidad", sino que aparecen explícitos en otros cinco y subtienden explícitamente los restantes. Desde este predominio cabría señalar la ausencia de una auténtica discusión de lo que llamar empirismo, cuasi-experimentalismo, etc., en las ciencias empíricas; nociones que parecen darse por sabidas y como si carecieran de problemática.

Ello distorsiona un tanto el volumen aquí comentado en el sentido de que, si bien se marginan los temas de fundamentos como si fueran lo único a lo que la filosofía de la matemática se abocara en los primeros años de este siglo, ahora se cae de pleno en una especie de naturalismo acrítico. Con una diferencia: quienes se acercaron y realizaron una filosofía de la matemática desde el enfoque de fundamentos en los últimos años del s. XIX y primeros del XX, eran matemáticos que, a la vez que pretendieron unos fundamentos, realizaron unas contribuciones, desde esa perspectiva, al hacer matemático. Algo que, desde este naturalismo acrítico, inmerso plenamente en el ámbito de lo filosófico, parece ya inviable. Se tiene el peligro de caer en querellas puramente filosóficas como ocurrió con los ensayos que siguieron al dilema de Benacerraf en la década de los setenta. Dilema que planteaba, en el fondo, un problema de carácter epistemológico, con su aceptación acrítica de la teoría causal del conocimiento, y que iba mucho más allá del espacio de la matemática.

Dada la amplitud y complejidad de los temas tratados parece más honrado señalar, aquí, los nombres de quienes contribuyen con sus ensayos a este volumen. Con indicación previa de que, a pesar de lo último criticado, esta obra constituye una aportación importante a uno de los temas que ha adquirido, en los últimos años, una radical preeminencia, la filosofía de la matemática. Preeminencia por la cual se le dedican números extraordinarios de revistas, libros-fuente, congresos, reuniones, symposia... Y el de septiembre de 1990 en la Universidad del País Vasco fue uno de los más representativos, tanto por los temas como por los autores que allí intervinieron. De ellos, los que contribuyen a este volumen son: Mac Lane, Lawvere, Ibarra-Mormann, Rantala, Niiniliuoto, Breger, Grattan Guinness, Resnik, Torretti, Scheibe, Schmidt, Da Costa-Doria, Howwon, Dauben, Echeverría, Knobloch, Jahnke, Otte, Feferman, Mahoney, Mosterín, Sneed, Moulines.

El volumen del que aquí se da noticia es importante al mostrar la complejidad y dificultad que se tiene en la orientación de una nueva filosofía de la matemática, en la búsqueda del *Espacio de la Matemática* que es el título adoptado por los editores a los que, evidentemente, hay que agradecer el trabajo desplegado. (J. de L.)

Biología dinámica

De la especie al gen

ALFRED RUSSEL WALLACE. AN ANTHOLOGY OF HIS SHORTER WRITINGS. Edición preparada por Charles H. Smith. Oxford University Press; Oxford, 1991.

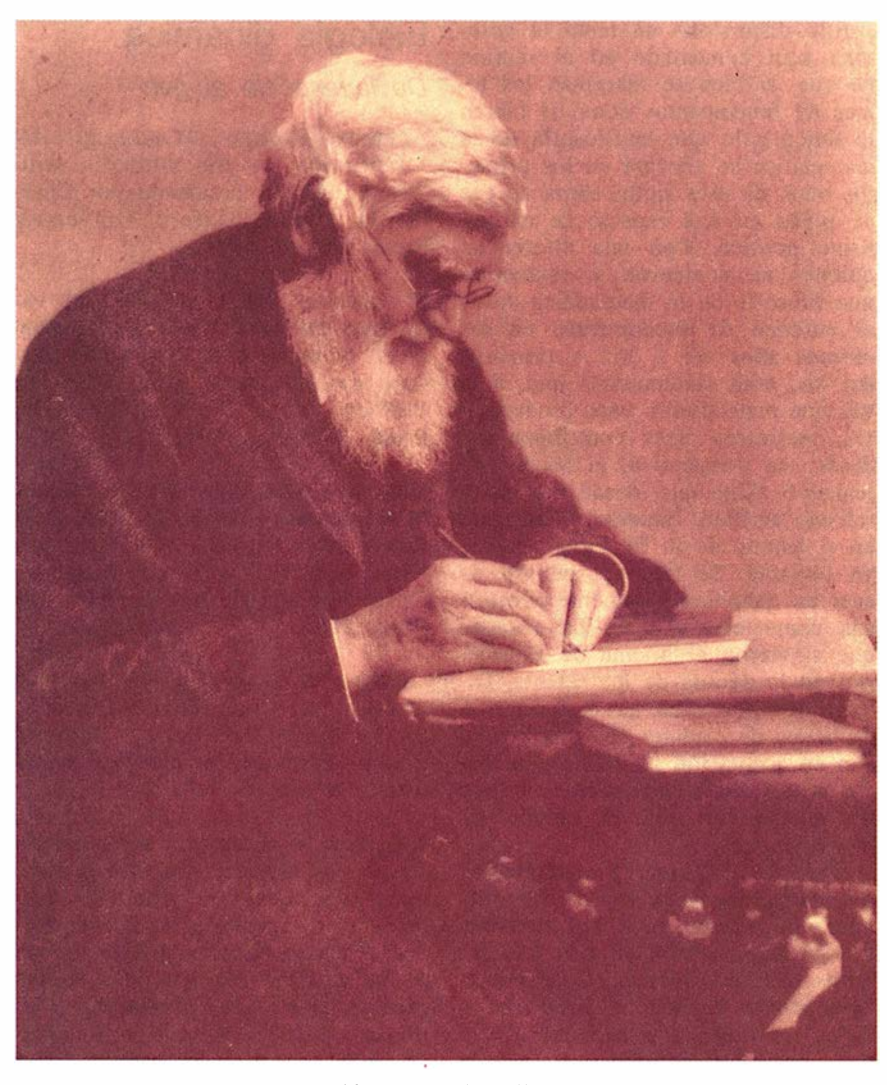
MATERIALS FOR THE STUDY OF VARIATION TREATED WITH SPECIAL REGARD TO DISCONTINUITY IN THE ORIGIN OF SPECIES, por William Bateson. Johns Hopkins University Press; Baltimore, 1992.

THE DYNAMIC GENOME. BARBARA MCCLINTOCK'S IDEAS IN THE CENTURY OF GENETICS. Dirigido por Nina Fedoroff y David Botstein. Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1992.

GENES AND GENOMES. A CHANGING PERSPECTIVE, por Maxine Singer y Paul Berg. University Science Books—Blackwell Scientific Publications; Oxford, 1991.

Primero se estableció la evolución de las especies. Se discutió luego el mecanismo en virtud del cual procedía la aparición de nuevas formas. Creyóse durante mucho tiempo en el carácter estático de algo tan decisivo para la supervivencia como los principios de la transmisión hereditaria. Aceptada, y comprobada en todos los organismos, la naturaleza dinámica del genoma se trabaja ahora con ahínco en su desentrañamiento. Esa es la historia de un poderoso sector de la biología de los últimos cien años: ¿quiénes marcaron el rumbo?

Sin ser un desconocido, Alfred Russel Wallace (1823-1913) no ocupa en los manuales, en la ciencia quintaesenciada, en la memoria escrita, el lugar que le corresponde. Cualquier intento por concederle la primacía de la hipótesis de la evolución de las especies a través de la selección natural queda de inmediato sofocado por los centuriones de la ortodoxia darwinista. Sólo la lectura de los textos, la información, permitirá que el lector se haga su propia idea. Basta este florilegio, *An Anthology of His Shorter Writings*, para comprobar algo que nadie le discute: Wallace fue el evolucionista más sólido de cuantos intervinieron en la creación del llamado paradigma darwinista, incluido el propio Darwin. También el más generoso al reconocer y apuntalar los mecanismos de selección y utilidad (o adaptación) propuestos por este último, o al de-



Alfred Russel Wallace

sarrollar la teoría de la mímesis animal de su amigo Henry Walter Bates.

De formación autodidacta amasada con la lectura de Humboldt, Lyell, Chambers y Malthus, sin otra preparación regular que la primera enseñanza, marchó en 1848 con Bates a América del Sur para observar en la naturaleza amazónica la realidad de la variabilidad y evolución de las especies, cuyo resultado cristalizaría en *A Narrative of Travels on the Amazon and Rio Negro*.

A ese primer viaje le siguió una segunda campaña por el archipiélago malayo o indonesio (resumida en *The Malay Archipielago*), donde recogió numerosas pruebas de lo que constituiría una de sus principales aportaciones a la historia de la ciencia: la distribución geográfica de la especies de acuerdo con el lugar y tiempo de aparición.

La perspicacia que mostró en la identificación de las pautas de comportamiento de animales y plantas, así como su asociación con la orografía (ríos, islas), se refleja en la fina interpretación de la cultura humana, la historia, la arqueología, la sociología o etnología, disciplinas a las que aplicaba el mismo rigor metodológico. Smith agrupa en ocho parágrafos los escritos agavillados: antropología, espiritualismo, cuestiones sociales sobre la propiedad, la campaña anti-vacuna, biogeografía, evolución, geografía física y geología y miscelánea (sistemática, educación geográfica y astronomía).

Para Wallace, la antropología es la ciencia que estudia el hombre (ser animal, moral e inteligente) en sus relaciones con los organismos inferiores, los demás hombres y el universo. Aúna, pues, los enfoques del fisiólogo, del experto en anatomía comparada, del historiador, paleontólogo, psicólogo, filólogo y frenólogo. De todas esas fuentes se vale para separar al hombre del curso general de la evolución, una de sus tesis más controvertidas por los darwinistas de estricta observancia, quienes encontraron tierra abonada para desprestigiarlo en su adhesión a ciertas corrientes paranormales (mesmerismo y espiritismo).

La oposición de Wallace a la generalización de la vacunación preventiva, una postura que gozó de cierto predicamento a finales del siglo pasado, debe entenderse en el marco de la introducción de las estadísticas en la higiene pública, que habían de liberar al pueblo llano de los intereses corporativos de la clase médica: a largo plazo, no parecía —creíase erróneamente— que la vacunación evitase la viruela, sino que incrementaba su propagación. Su tesis biogeográfica —cada una de las especies ha aparecido coincidente en el tiempo y en el espacio con otra especie preexistente estrechamente relacionada con ella— se articula en diez puntos, cuatro geográficos y seis geológicos, relativos aquéllos al espacio y éstos al tiempo geológico. Para fundamentar su descubrimiento del mecanismo de selección o alejamiento del prototipo original, buscó en todos los casos las causas inmediatas —físicas o climáticas y biológicas— de la transformación.

Dura fue la reacción del Wallace darwinista a las propuestas de William Bateson en *Materials for the Study of Variation Treated with Special Regard to Discontinuity in the Origin of Species*, aparecida en 1894 y ahora reimpresa con una sobria introducción de Peter J. Bowler y un ensayo doctrinal —bastante obscuro— de Gerry Webster. Se ganó, asimismo, la enemiga de la escuela biométrica encabezada por Karl Pearson y W. F. R. Weldon. Fue tal el influjo de su distanciamiento de la ortodoxia oficial, que se le atribuye un papel principal en lo que Julian Huxley llamó "eclipse del darwinismo" en el cambio de siglo.

Del título mismo se desprende, se ataca aquí uno de los principios sagrados de la teoría darwinista, el de la variación continua y gradual. Mina también el valor de la adaptación. Pero Bateson no se limita a negar. Construye un edificio teórico de singular potencia sobre la formación de las especies a través del estudio de la variación morfológica de padres a hijos y de un grupo taxonómico a otro.

Es uno de los primeros en intuir el problema de la circularidad y el del verbalismo sin fundamento en la observación. Se enseña, dice, la tesis de la evolución y se escribe sobre la misma sin más apoyatura que un par o tres de ejemplos ajados, como si fueran generalizables. El propone,

por contra, recoger cuantos trabajos se han publicado sobre distintos grupos, extender la investigación a otros y, sobre ese archivo de datos, empezar a inferir de qué modo aparecieron nuevas formas. Con otras palabras, antes de hablar de evolución hay que ocuparse de la variación tal cual la advertimos en el registro fósil y entre los seres vivos.

Había anticipado su hipótesis en 1886, en un trabajo sobre la filogenia de los cordados. Frente a quienes sostenían que éstos debían originarse de algún antepasado segmentado, Bateson defendía, mediante la comparación de caracteres entre *Dolichoglossus kowaleskii* (conocido entonces por *Balanoglossus*) y cordados, que la cuantía de semejanzas permitía pensar en una vinculación evolutiva, y sugería como mecanismo verosímil la duplicación o repetición de partes, hasta adquirir la segmentación; suponía eso que la repetición de partes anatómicas constituía una peculiaridad general de todos los organismos.

Ya elaborado, el mecanismo se convierte en el eje temático de *Materials*. Las variaciones pueden ser continuas y discontinuas. No tiene sentido, dice, obligar a intervenir la selección en incipientes modificaciones, si lo que ha de sobrevivir es un ser plenamente constituido. Aborda así las pautas repetitivas, las variaciones merísticas de una estructura fuente, que, por fuerza, deben ser discontinuas.

Su planteamiento de la cuestión es impecable: las formas de los seres vivos, diversas, son discontinuas y específicas; las formas específicas se hallan ajustadas a los hábitats donde medran; los naturalistas tienen que responder a los modos y las causas de la aparición de esas formas; importa, pues, conocer las respuestas dadas (lamarckismo y darwinismo), cribarlas y aportar, si son limitadas, explicaciones alternativas. Para él, rechazando la solución de quienes proponen las instancias del medio cambiante, el quid de la respuesta ha de encontrarse en el propio ser vivo, en la variación merística. Para que no quede la sustitución en mero juego de palabras, pasa revista a todo el reino animal.

Bateson se esforzó incluso por llevar sus ideas al terreno de la genética, nombre que él acuñó y a la que aportó la noción de herencia correlacionada, o *acoplamiento gamético*, que ponía en cuestión la doctrina mendeliana de la herencia de unidades discretas. Pero la nueva disciplina comenzaba a seguir un camino propio, al otro lado del Atlántico, una vía que pronto convertiría en coto casi privado Barbara McClintock, nacida en 1902 y fallecida recientemente. *The Dynamic Genome* recapitula noventa años de genética, a través del recuerdo de la población fundacional y reconstrucción de las aportaciones de los miembros de la segunda, tercera y cuarta generaciones.

McClintock no escribió mucho, 73 artículos. Sus piezas son, sin embargo, piedras miliares, indicativas, como tales de la situación y del rumbo: "Necesitamos para el estudio genético del sobrecruzamiento que se dé la condición heterozigótica de dos factores alelomorfos en el mismo grupo de ligamiento. El análisis del comportamiento de cromosomas homólogos en todo o en parte, que se distinguen morfológicamente en dos puntos, debe poner de manifiesto el sobrecruzamiento citológico. Nos proponemos en este trabajo demostrar que existe el sobrecruzamiento citológico y que va acompañado de sobrecruzamiento genético." (Sobrecruzamiento es el intercambio recíproco de segmentos cromosómicos por rotura y posterior unión cruzada.)

No obstante esa claridad expositiva, tardóse decenios en aceptar su descubrimiento más famoso, el de los transposones, la existencia de elementos genéticos que saltaban de un lugar a otro del genoma y controlaban la expresión de otros genes. Encuadraba ese fenómeno en un ciclo de tres pasos (ruptura, fusión y puente), en virtud del cual hallaba la explicación de la variegación de los granos de las mazorcas del maíz.

La mayor parte de la treintena casi de las colaboraciones aquí recogidas detallan la ampliación del principio a distintos sistemas orgánicos. Por una, diría yo, debiera empezar el lector, por el ensayo de Marcus M. Rhoades, compañero suyo de muchísimos años, que rememora el ambiente en que se formó McClintock en Cornell con Rollins Adams Emerson. Así recuerda el origen remoto en Nebraska, primera etapa académica de Adams: "Deseando (Emerson) familiarizar a sus alumnos con el material que ilustraba las leyes de Mendel recientemente redescubiertas, Adams, siguiendo el ejemplo de Correns, cruzó una variedad almidonosa con otra azucarada, separó las plantas F_1 y distribuyó las mazorcas separadas entre los alumnos para que contaran los granos almidonosos y los azucarados. Cuando le entregaron sus resultados, Emerson vio que las proporciones almidonosos-azucarados se alejaba de la razón 3:1 de la que hablaba Correns... Lo atribuyó a la negligencia de los estudiantes. Y se puso él a contar. Los alumnos no mentían. Había algo que fallaba en la ley de la segregación de Mendel. Se propuso averiguarlo. Así nació la genética del maíz."

De entre las múltiples obras recientes sobre genética, ninguna gana en eficacia pedagógica y hondura a *Genes and Genomes*. Esa es la razón por la que las situamos a la par con las tres precedentes y, si bien no aporta ninguna novedad como manual que es, puede reputarse ejemplar para cuantos decidan adentrarse en la ciencia de la herencia. Tal vez le sobran las páginas prologales, que responden a un contexto social muy preciso, el de la resistencia del público norteamericano a las nuevas técnicas de experimentación en microorganismos para modificar su naturaleza.

Avanza gradualmente, desde una visión general de partida hasta las líneas de investigación apenas incoadas. No da un paso sin que el concepto fundamental quede asentado, entrecruza los ejemplos con el relato teórico de base y despliega un derroche inconográfico que, si peca de algo, es de desmenuzar la explicación sin dejar margen a la reflexión ni a los interrogantes asociados. Casi diez años han invertido los autores en ordenar la información, transcribirla, depurarla y traducirla al román paladino, por emplear el símil genético fundamental.

Llegado el momento, prestan atención al mecanismo o la técnica que hizo posible un nuevo salto hacia adelante, con una chispa de humor, si procede, que desenmascara el hieratismo observado por estos pagos: "Estos métodos reciben a menudo apodos divertidos. La hibridación del ADN se denomina hibridación de Southern en honor de su descubridor; más tarde se desarrolló la hibridación del ARN y se la llamó hibridación Northern e hibridación Western la operada con proteínas." Juego que se le escapa al lector español habituado a las expresiones *Southern blotting, Northern blotting* y *Western blotting*, hipostasiadas como si fueran conjuros.

Un sesgo buscado en aras de la propedéutica es su insistencia en los sistemas unicelulares, los más sencillos, y los que realmente promovieron el despegue espectacular de una disciplina cuyo cuerpo doctrinal tiene una treintena escasa de vida. Pero no desmerece el resumen sobre el desarrollo de *Drosophila*, por ejemplo. (L. A.)

Apuntes

Para fusión fría la que se ha conseguido en la Universidad de Minnesota con la síntesis de una molécula diatómica de helio. Pese a que este elemento se licúa a 4,2 grados kelvin y se han creado microagregados desde tiempo atrás, la molécula de par de átomos difícilmente sobrevive a temperaturas de milikelvin. La síntesis se ha logrado mediante el enfriamiento del gas presionándolo en un vacío. El pozo de potencial que mantiene juntos los átomos es tan débil que la mínima vibración rompe el enlace.

Se creyó siempre empeño frustrado la formación de hélices estables dobles y triples que combinaran hebras monocatenarias de ARN y ADN. Apoyábase el escepticismo en la tendencia, desestabilizadora, que muestra el ARN a adoptar la forma helicoidal A. Pero no hay tal. Los híbridos ADN-ARN no terminan necesariamente en la forma A. En las hélices triples se prefiere al ARN para tercer componente y las cadenas de pirimidinas, en tanto que el ADN es el privilegiado en la cadena de purinas. En general, los dúplices estables son tríplices inestables, y viceversa.

Aunque los montes del Himalaya son el producto de las colisiones tectónicas intercontinentales, la evolución orogénica del Tibet se ha caracterizado por una extensión que se proyecta de oriente a occidente, cuyo origen y naturaleza ha intrigado a la geomorfología. A primera vista, son un reblandecimiento cortical ante la altura y espesor allí desarrollados. No se conoce bien, sin embargo, el tiempo que transcurre entre la formación de la extensión y el levantamiento y metamorfismo de la cordillera. La investigación sugiere, con los datos recabados en un sistema extensional del Tíbet, que el proceso extensivo podría haber acompañado o seguido a episodios de metamorfismo ocurridos hace entre 19 y 22 millones de años.

La sencillez, como la verdad, acaba imponiéndose. Desde su descubrimiento, hará una treintena de años, los cuásares han estado envueltos en el misterio a pesar de su brillo espectacular. ¿Cómo pueden lucir tanto si se les sitúa en los confines del universo? De acuerdo con la hipótesis imperante deben su energía a imponentes agujeros negros que promoverían la incandescencia de las galaxias circundantes. Hipótesis ahora cuestionada por otra explicación más simple: la luz viene emitida por pulsos sincronizados de nacimiento y muerte en los núcleos de galaxias jóvenes.

Cuando no se dispone de un método directo, se aconseja acudir a la combinación de varios indirectos. Diversas técnicas sísmicas se han empleado, en efecto, para sondear la región de manto en fusión parcial que subyace bajo las dorsales meso-oceánicas, zona suministradora de magma para la formación de nueva corteza oceánica. Se examinó por una vez, no las acostumbradas ondas de reflexión o refracción, sino la atenuación de dichas ondas sísmicas a través de la neocorteza gestante. Y se ha llegado a la conclusión de que el magma en los centros de dispersión no llega al kilómetro de potencia y recubre el manto semifundido.

Poco a poco se va haciendo la luz sobre el Descubrimiento y la ocupación española. La idea atrabiliaria de unos colonos esquilmadores no parece compadecerse con la realidad. Se venía repitiendo que la degradación del altiplano de México central debióse a la introducción del arado en las prácticas agrícolas indígenas, más respetuosas con el entorno. Pero el análisis edafológico ha puesto de manifiesto que la erosión del suelo provocada por la agricultura llevada por los españoles no superó la normal de las prácticas mexicanas.